



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos.*  
**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



# **MODELO PARAMÉTRICO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL COMPARATIVO PUENTE ARCO DE LA REGENTA**

Trabajo realizado por:

*Roberto Oslé García*

Dirigido:

*Guillermo Capellán Miguel*

*Santiago Guerra Soto*

*Javier Sánchez Haro*

Titulación:

**Máster Universitario en Ingeniería de  
Caminos, Canales y Puertos**

Santander, julio de 2021

**TRABAJO FIN DE MASTER**

## Resumen

En el presente proyecto de investigación, realizado bajo la supervisión de la cátedra Arenas, se muestra el potencial de las técnicas de diseño paramétrico, mediante la optimización teórica del Arco de la Regenta.

Para lograr el objetivo anteriormente descrito, se ha desarrollado un modelo paramétrico y otro estructural, derivado del primero. Estos modelos se han generado utilizando programas comerciales.

## Abstract

In this research project, carried out under the supervision of the Cátedra Arenas, the potential of parametric design techniques is shown, through the theoretical optimization of the Arco de la Regenta.

To achieve the objective described above, a parametric and a structural model have been developed, derived from the first. These models have been generated using commercial programs.

## Contenido

1	INTRODUCCIÓN .....	6
1.1	MOTIVACIÓN .....	6
1.2	OBJETIVOS.....	7
1.3	JUSTIFICACIÓN .....	8
1.4	ESTRUCTURA .....	8
1.5	METODOLOGÍA .....	9
1.5.1	PUENTE OBJETO DE ESTUDIO .....	9
1.5.2	INSTRUMENTOS.....	11
1.5.3	PROCEDIMIENTO .....	11
2	ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	14
2.1	INTRODUCCIÓN.....	14
2.2	SISTEMAS DE DISEÑO PARAMÉTRICO .....	14
2.2.1	DEFINICIÓN .....	14
2.2.2	EVOLUCIÓN HISTÓRICA.....	14
2.3	INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA BIM .....	21
2.3.1	DEFINICIÓN .....	21
2.3.2	CARACTERÍSTICAS .....	22
2.4	LOS PUENTES ARCOS DE JUAN JOSE ARENAS .....	25
2.4.1	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS .....	25
2.4.2	BREVE DESCRIPCIÓN DE CADA PROYECTO.....	27
3	EL PUENTE ARCO DE LA REGENTA.....	41
1.1	INTRODUCCIÓN.....	41
3.1	UBICACIÓN .....	41
3.2	DESCRIPCIÓN DEL PUENTE.....	41
3.2.1	JUSTIFICACIÓN DE LA TIPOLOGÍA.....	41
3.2.2	DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS.....	43
4	MODELO PARAMÉTRICO .....	46
4.1	INTRODUCCIÓN.....	46
4.2	INFORMACIÓN DEL MODELO.....	46
4.2.1	NIVELES BIM.....	46
4.2.2	SOFTWARE .....	46
4.2.3	IDEALIZACIÓN .....	47
4.3	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO .....	49
4.3.1	GEOMETRÍA.....	49
4.3.2	VOLUMEN CENTRAL DEL ARCO .....	60

4.3.3	EXPORTACIÓN.....	61
4.4	VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS. ....	64
5	ANÁLISIS ESTRUCTURAL .....	66
5.1	INTRODUCCIÓN.....	66
5.2	BASES DE LA OPTIMIZACIÓN .....	66
5.2.1	OBJETIVOS.....	66
5.2.2	CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN .....	67
5.3	INFORMACIÓN .....	68
5.3.1	CARACTERÍSTICAS DEL MODELO .....	68
5.3.2	ACCIONES CONSIDERADAS .....	68
5.4	PROCESO DE OPTIMIZACIÓN .....	70
5.4.1	JUSTIFICACIÓN .....	70
5.4.2	DIRECTRIZ .....	71
5.4.3	SECCIÓN TRANSVERSAL. CANTOS EN LOS ARRANQUES.....	77
5.4.4	SECCIÓN TRANSVERSAL. CANTO EN CLAVE. ....	81
5.4.5	COMPROBACIONES FRENTE A LAS CARGAS DE TRÁFICO. ....	84
5.4.6	RESULTADO DE LA OPTIMIZACIÓN. ....	88
6	CONCLUSIONES.....	92
6.1	INTRODUCCIÓN.....	92
6.2	SOBRE EL DISEÑO PARAMÉTRICO .....	92
6.3	SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO PARAMÉTRICO .....	92
6.4	SOBRE EL ANÁLISIS Y LA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL .....	93
6.5	CONCLUSIONES GLOBALES .....	95
7	BIBLIOGRAFÍA .....	96
8	ANEJO-1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL. ....	97
8.1	AJUSTE DE LA DIRECTRIZ .....	97
8.2	AJUSTE DEL CANTO DEL ARRANQUE .....	99
8.3	AJUSTE DEL CANTO EN CLAVE .....	102
8.4	RESULTADOS ENVOLVENTES DEL FLECTOR.....	105
8.4.1	SITUACIÓN INICIAL .....	105
8.4.2	SITUACIÓN FINAL .....	107
8.5	ENVOLVENTES DE LOS AXILES. CASO FINAL. ....	109

## Índice de figuras

Figura 1. Parámetros básicos de la parametrización .....	7
Figura 2. Modelo paramétrico de Gaudí para la colonia Güell .....	15
Figura 3. Modelo paramétrico de Frei Otto para representar láminas estructurales. ....	16
Figura 4. Modelo paramétrico de Moretti expuesto en la XII Triennale di Milano. ....	17
Figura 5. Ejemplos de restricciones de Skethpad. ....	18
Figura 6. Puente de las Oblatas .....	28
Figura 7. Puente de la Barqueta. ....	29
Figura 8. Puente de la Regenta. ....	30
Figura 9. Puente de Morlans. ....	31
Figura 10. Puente del Barrial .....	32
Figura 11. Puente di congresi. Solución inicial .....	33
Figura 12. Puente di congresi. Solución actual. ....	33
Figura 13. Puente de Hoznayo. ....	34
Figura 14. Puente de Villaverde. ....	35
Figura 15. Puente del Tercer milenio. ....	36
Figura 16. Puente de la vaguada de las Llamas. ....	37
Figura 17. Puente de Almonte. ....	38
Figura 18. Alzados tridimensionales del antiguo y nuevo puente de Golbardo. ....	39
Figura 19. Nuevo puente de Golbardo. ....	40
Figura 20. imagen tras finalizar la construcción y alzado general .....	42
Figura 21. Detalle del tablero ampliado y secciones tipo. ....	45
Figura 22. Bondad del ajuste parabólico de la directriz. ....	48
Figura 23. Parámetros del arco. ....	49
Figura 24. Definición de los parámetros del arco. ....	49
Figura 25. Creación del terreno 3d. ....	50
Figura 26. Encaje de la luz y representación de la directriz. ....	51
Figura 27. Parámetros de las secciones del arco. ....	51
Figura 28. Representación de las secciones transversales del arco. ....	52
Figura 29. Construcción del solido 3d del arco. ....	53
Figura 30. Parámetros de la cimentación del arco. ....	53
Figura 31. Parámetro distancia pila-arranque. ....	54
Figura 32. Construcción de los sólidos 3d de las cimentaciones del arco. ....	54
Figura 33. Obtención de luces del vano del arco y vanos de aproximación. ....	55

Figura 34. Parámetros para las pilas y sus cimentaciones. ....	56
Figura 35. definición de la sección de las pilas. ....	57
Figura 36. Generación de las pilas. ....	57
Figura 37. Definición de las cimentaciones de las pilas. ....	58
Figura 38. parámetros de la sección del tablero. ....	59
Figura 39. Construcción de la sección sin aligerar del tablero. ....	59
Figura 40. Definición de los aligeramientos del tablero. ....	60
Figura 41. Obtención del solido 3D del tablero. ....	60
Figura 42. Obtención de los núcleos centrales. ....	61
Figura 43. Definición del volumen central y exportación excentricidades. ....	61
Figura 44. Operaciones previas a la creación del modelo estructural con Karamba3d. ....	62
Figura 45. Modelo en Karamba3d y exportación al programa de cálculo estructural. ....	62
Figura 46. Vista global de la programación del modelo paramétrico. ....	63
Figura 47. Perspectiva del modelo paramétrico. Detalle del arco. ....	64
Figura 48. Perspectiva del modelo paramétrico. Detalle del tablero. ....	64
Figura 49. Perspectiva general y detalle del arco del modelo estructural. ....	65
Figura 50. Variación del volumen respecto al inicial. ....	72
Figura 51. Flectores para el ajuste de la directriz. ....	73
Figura 52. Axiles para el juste de la directriz. ....	73
Figura 53. Líneas de presiones para los ajustes de las directrices. ....	75
Figura 54. Flectores para el ajuste del canto del arranque. Casos en función de H/L. ....	78
Figura 55. Axiles para el ajuste del canto del arranque. Casos en función de H/L. ....	78
Figura 56. Líneas de presiones para el ajuste del canto del arranque. ....	80
Figura 57. Flectores para el ajuste del canto en clave. ....	82
Figura 58. Flectores para el ajuste del canto en clave. ....	82
Figura 59. Líneas de presiones para el ajuste del canto en clave. ....	83
Figura 60. Líneas de presiones para las envolventes de las cargas de tráfico. ....	85
Figura 61. Flectores máximos sobre el arco. ....	86
Figura 62. Envolvente de esfuerzos axiles. ....	88
Figura 63. Envolventes de las líneas de presiones inicial y final. Máxima flexión negativa. ....	89
Figura 64. Envolventes de las líneas de presiones inicial y final. Máxima flexión positiva. ....	90
Figura 65. Comparativa visual entre viaducto optimizado (amarillo) y el inicial (rojo). ....	91

## Índice de tablas

Tabla 1. Principales características de los puentes arcos de Arenas. ....	27
Tabla 2. Sobrecarga tráfico. ....	69
Tabla 3. Sobrecarga vehículo pesado. ....	69
Tabla 4. Directrices consideradas. ....	72
Tabla 5. Casos de ajuste de la sección. Canto en los arranques. ....	77
Tabla 6. Casos de análisis. Canto en Clave. ....	81

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 MOTIVACIÓN

Actualmente el uso de los modelos BIM en el ámbito de la ingeniería de puentes, presenta ciertas limitaciones debido a los problemas existentes para generar modelos que integren geometría 3D y análisis estructural. Con el fin de permitir esta vinculación se está empezando a extender el diseño paramétrico. Las principales ventajas de este tipo de técnicas son:

- Adaptación y flexibilidad: permite que se generen infinidad de cambios, hecho que se traduce en una mayor capacidad de diseño.
- Automatización: se simplifica el proceso de diseño, reduciendo, en gran medida, el tiempo que deben dedicar los ingenieros del proyecto en realizar tareas monótonas.
- Optimización: como consecuencia de las otras dos ventajas anteriores, resulta mucho más sencillo proponer soluciones de menor coste.

Hoy en día existe una clara tendencia hacia la incorporación de los modelos paramétricos a la hora de diseñar complejas estructuras, como es el caso de los puentes. No obstante, pese a su gran utilidad, todavía su uso está poco difundido debido a que:

- No existe una clara definición formal de que requerimientos debe tener un diseño paramétrico. Cada organización o particular emplea este concepto en función de sus propios intereses.
- Tampoco existen investigaciones de carácter teórico práctico que defiendan y promuevan su uso.

En base a estos hechos el presente documento se pretende aportar información veraz y útil que fomente el uso del diseño paramétrico.



## 1.2 OBJETIVOS

Los objetivos de la investigación llevada a cabo con este trabajo fin de máster son desarrollar una herramienta BIM para generar el modelo paramétrico del Puente Arco de la Regenta y realizar, en base a este modelo, la optimización estructural del arco, minimizando sus esfuerzos flectores.

Con el fin de cumplir con estos objetivos en el presente trabajo se abordan los siguientes aspectos:

- Construir un modelo paramétrico, que incluya un modelo estructural integrado que se exporte de forma automática al programa de cálculo estructural.
- Realizar la optimización del elemento arco variando las directrices y secciones transversales. Los principales ajustes de este proceso pueden verse a continuación (Figura 1).

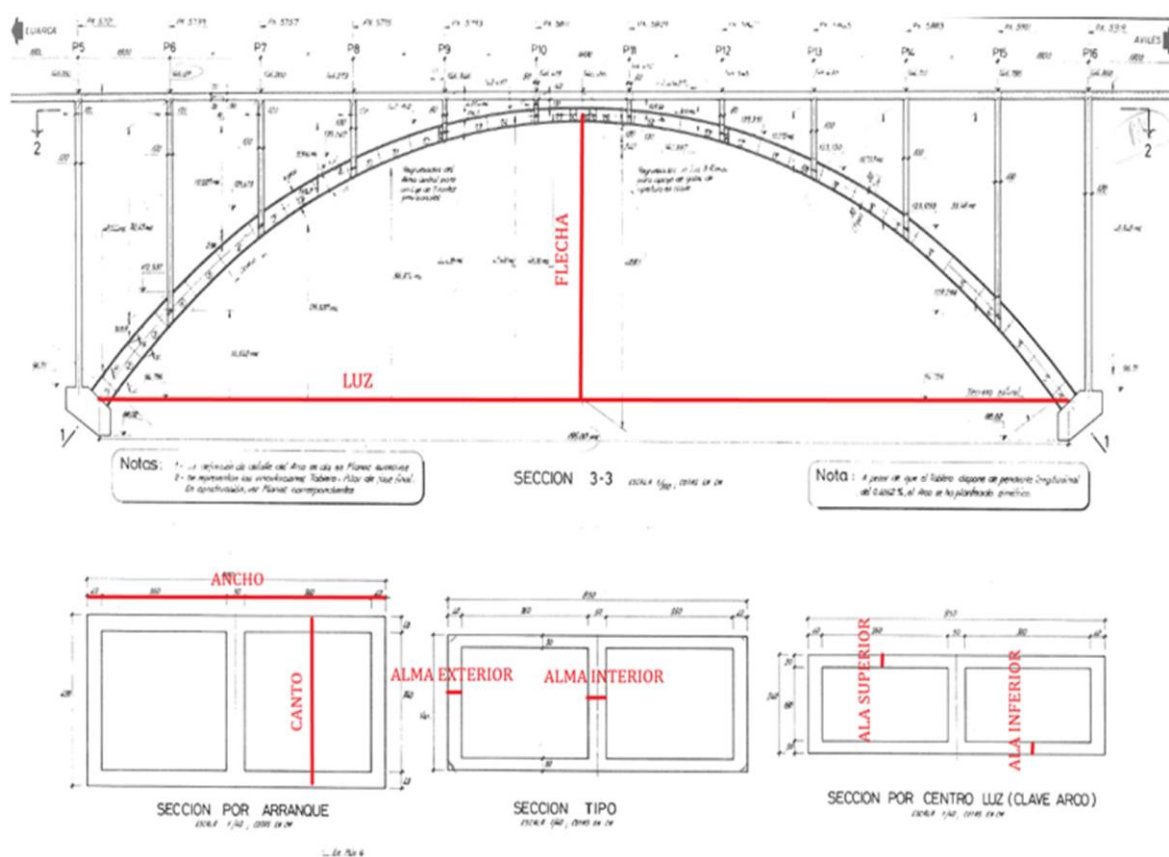


FIGURA 1. PARÁMETROS BÁSICOS DE LA PARAMETRIZACIÓN

- No se considera condicionantes geotécnicos al no disponer de la información del terreno, salvo una limitación en el incremento de los empujes del arco. Se considerará que el terreno puede resistir el aumento de estos esfuerzos

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, existe una clara tendencia hacia la incorporación de los modelos BIM paramétricos a la hora de diseñar complejas estructuras, como es el caso de los puentes. Gracias a estas técnicas se pueden generar modelos de muy bajo coste que permiten:

- La búsqueda de alternativas soluciones óptimas para una determinada tipología estructural.
- La realización de cambios automáticos que permiten adaptarse a cambios en los condicionantes del diseño en cualquier etapa del proyecto (diseño construcción etc.)

Estas virtudes de los modelos paramétricos son las que justifican en última instancia la presente investigación con el fin de mostrar, mediante el desarrollo de la optimización teórica un caso concreto, el importante ahorro económico y de plazos que pueden llegar a suponer el empleo de estos modelos.

### 1.4 ESTRUCTURA

EL presente trabajo se ha organizado en los siguientes capítulos para facilitar, cada uno de ellos con una serie de objetivos:

1. INTRODUCCIÓN: se trata del presente capítulo, sirve de base para explicar los objetivos del trabajo, el proceso y fases de la investigación, y para introducir los temas abordados en este trabajo.
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO: se define el modelo paramétrico y se expone su evolución histórica. También se define la metodología BIM y se describen sus principales características y se realiza un breve recorrido a los puentes arcos de Juan José Arenas.

3. CASO DE ESTUDIO. PUENTE ARCO DE LA REGENTA: se realiza una descripción del puente objeto de estudio de esta investigación, con especial énfasis en la tipología estructural y la geometría, con el fin de lograr una adecuada comprensión de las características de los distintos elementos que lo forman.
4. MODELO PARAMÉTRICO: se explica cómo se generan los distintos elementos del modelo, y cuáles son los parámetros que los definen. Además, se fija el grado de implantación de la metodología BIM del modelo y se realiza un comentario de las limitaciones y simplificaciones
5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL: se detallan las principales características de los objetivos de optimización estructural, las cargas que se emplean y se muestran los resultados del proceso de optimización.
6. CONCLUSIONES: se comentan las principales conclusiones que se obtienen del desarrollo de todos los capítulos precedentes.
7. BIBLIOGRAFÍA: se adjuntan las referencias de las fuentes consultadas.

## 1.5 METODOLOGÍA

### 1.5.1 PUENTE OBJETO DE ESTUDIO

Lógicamente, como la finalidad de este trabajo es puramente académica existen una serie de simplificaciones y limitaciones de la realidad, que deben tenerse en consideración, respecto a los modelos paramétricos y estructurales empleados.

#### 1.5.1.1 LIMITACIONES DEL MODELO PARAMETRICO

- El modelo paramétrico base de este proyecto se basa en los planos no definitivos. Este hecho supone que el tablero analizado sea una losa aligerada, de hormigón pretensado con dos carriles de circulación, en lugar de un cajón mixto de dos carriles de circulación, ampliados recientemente a cuatro.

Las directrices solo pueden variarse en el rango comprendido entre  $1/3$  y  $1/10$ , por criterios ingenieriles, pues estos valores representan aproximadamente los límites del efecto arco y engloban los valores habituales de las soluciones de puentes reales. Nótese que en el presente trabajo no se han considerado las acciones reológicas, térmicas y los efectos de segundo orden, por lo que no se va a proponer una solución fuera de los rangos habituales para este tipo de estructuras.

- La relación entre la luz de los vanos y el tablero es fija y de valor  $1/10$ . Este valor es ampliamente utilizado en puentes arcos de tablero superior para asegurar una distribución uniforme de las cargas que actúan en el tablero, con el fin lograr un comportamiento homogéneo del arco.

#### 1.5.1.2 SIMPLIFICACIONES DEL MODELO ESTRUCTURAL

- El modelo estructural que se propone es de elementos tipo barra. No se analiza el reparto transversal de las sobrecargas sobre el tablero, considerando estas directamente aplicadas en los ejes de las barras, que conforman los vanos del tablero. Es decir, solo se realiza un análisis longitudinal del puente.
- En el análisis estructural se han considerado únicamente cargas verticales de: peso propio del viaducto, peso del firme y sobrecargas de tráfico, conforme a la norma IAP-11.
- El análisis estructural que se plantea es estático y lineal.

#### 1.5.1.3 LIMITACIONES DE LA VALIDEZ DE LOS RESULTADOS

- Los resultados obtenidos para la optimización teórica del arco responden principalmente a criterios estructurales, con la salvedad del criterio geotécnico que fija el incremento de los empujes máximos que pueden transmitirse al terreno.
- La optimización del arco solo responde a variaciones en su propia configuración geométrica. No se realizan cambios en el tablero y las pilas.

### 1.5.2 INSTRUMENTOS

Las principales herramientas que se emplean para esta investigación son el programa de diseño paramétrico Grasshoper y el software de cálculo estructural SAP2000.

### 1.5.3 PROCEDIMIENTO

- 1 Fijación de los objetivos y límites que se pretenden abordar con el desarrollo de este trabajo.
- 2 Recopilación de la bibliografía seleccionada para el desarrollo de la base teórica, tanto de los sistemas CAD como del diseño paramétrico, principalmente mediante la consulta de revistas técnicas y artículos en fuentes electrónicas.
- 3 Selección del software que se va a emplear para el desarrollo de la parte práctica, así como realizar pequeños ejemplos de autoaprendizaje para facilitar su posterior uso.
- 4 Desarrollo del modelo paramétrico, realizando las siguientes actividades:
  - Análisis de los planos para entender la geometría de partida y buscar relaciones geométricas, que permitan simplificar el número de variables que se emplean en el modelo paramétrico.
  - Búsqueda de criterios estructurales, como las limitaciones de flecha-luz o de luz de vano. Estas pueden suponer restricciones a la hora de generar el modelo paramétrico, pero que son fundamentales para que el modelo paramétrico se ajuste a la realidad estructural.
  - Construcción del modelo paramétrico.
    - Definición de la geometría en Grasshoper
    - Enlace con Karamba3D, dentro del entorno de Grasshoper
    - Exportación al programa de cálculo estructural SAP2000.

5 Análisis estructural a partir del modelo paramétrico desarrollado.

- Análisis estructural paramétrico de la directriz. Las fases de este análisis han sido:
  - Fijación de los criterios: limitaciones en la relación flecha luz entre  $1/3$  y  $1/10$  y limitación del incremento de los empujes del arco a un 70 % respecto los valores iniciales.
  - Tanteo de la directriz de análisis buscando situaciones de mínimo volumen.
  - Desarrollo de los casos seleccionados del apartado, manteniendo la geometría inicial de las secciones transversales del arco.
  - Elección de la directriz optima conforme al ajuste de la línea de presiones al núcleo central.
- Análisis estructural paramétrico del canto de la sección de arranque:
  - Fijación del criterio de parada en una esbeltez, relación canto-luz, en la sección de arranque de  $1/100$ . El hecho de emplear este valor se debe a que se trata de un valor límite para la esbeltez en las secciones de arranque ampliamente utilizado por Arenas en sus puentes arco.
  - Desarrollo de los casos de estudio en base a partir de directriz modificada en el análisis estructural previo, manteniendo el canto inicial en la sección de clave.
  - Elección del canto óptimo en la sección de arranque conforme al ajuste de la línea de presiones al núcleo central.
- Análisis estructural paramétrico del canto en clave:
  - Selección del criterio de parada en la mitad del canto inicial. Ajuste por tanteos.

- Desarrollo de los casos de estudio en base a la directriz y canto en arranque obtenido previamente.
  - Elección del canto optimo en la sección en clave conforme al ajuste de la línea de presiones al núcleo central.
  - Consideraciones sobre el resultado final.
- 6 Obtención de conclusiones y revisión general de todo el trabajo.

## 2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, En el ámbito de la ingeniería de puentes, se está produciendo una gran difusión de los sistemas del diseño paramétrico ligados a la metodología BIM, motivo por el cual se considera importante hablar en este capítulo de:

- SISTEMAS PARAMÉTRICOS: se explica que es y cuál ha sido la evolución del diseño paramétrico, con el fin de entender su uso actual.
- METODOLOGÍA BIM: se realiza una breve introducción a esta metodología para mostrar su estrecha conexión con el diseño paramétrico.

### 2.2 SISTEMAS DE DISEÑO PARAMÉTRICO

#### 2.2.1 DEFINICIÓN

Se entiende por diseño paramétrico, todo aquel sistema que se define en base a unas ecuaciones explícitas, expresadas en función de parámetros, que permite variar de forma sencilla y automática una determinada geometría (Daniel, 2013).

#### 2.2.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA

##### 2.2.2.1 ORIGEN

La primera constancia que se tiene del diseño paramétrico se remonta a 1837, año en que James Dana publicó un artículo sobre la optimización del corte teórico de diamantes, utilizando un conjunto de planos paramétricos. Posteriormente en 1842, Samuel Earnshaw definió, superficies hiperbólicas paramétricas para sentar las bases del teorema que lleva su nombre.

Como puede apreciarse, estas primeras referencias del diseño paramétrico solo se realizaron con fines de demostración científica, sin ningún tipo de implicación práctica.



### 2.2.2.2 MODELOS ANALÓGICOS

La primera constancia que se tiene del uso práctico de un modelo paramétrico se le atribuye a Antoni Gaudí, quien desarrolló un sistema paramétrico para definir formas antifuniculares de algunas de sus obras más importantes como la Capilla de la Colonia Güell o la Sagrada Familia, entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

El modelo de Gaudí era muy sencillo y efectivo, pues solo utilizaba un conjunto de cadenas fijas a dos extremos adaptables, para modificar la longitud de estas (Figura 2). En ellas Gaudí colgaba pesos, de diferente valor, para definir distintas curvas antifuniculares.

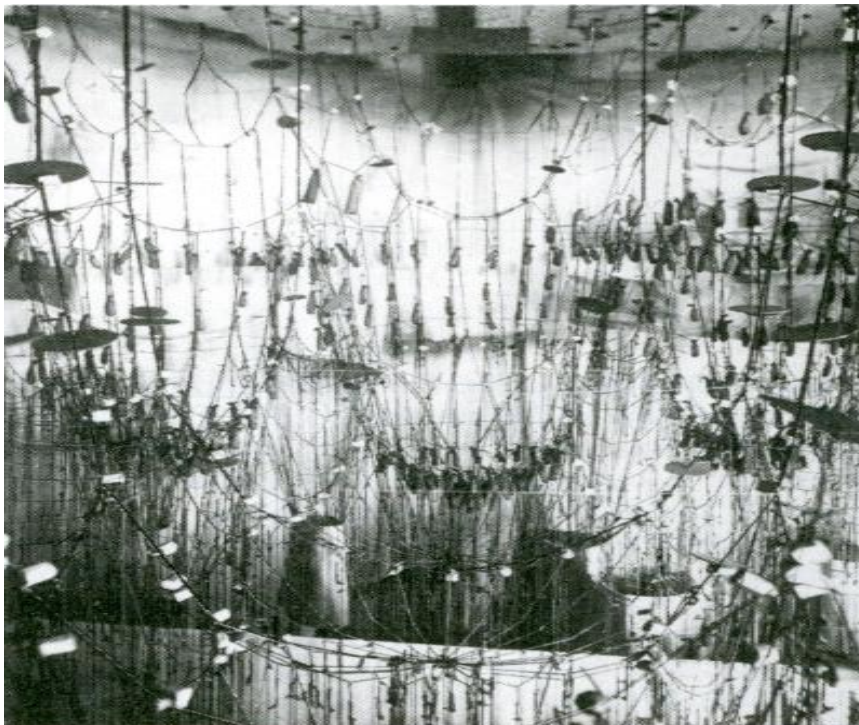


Figura 2. Modelo paramétrico de Gaudí para la colonia Güell

El modelo de Gaudí, único en su tiempo, fue una genialidad del arquitecto catalán, que es considerada como la base del primer sistema paramétrico de la historia. Este modelo comprendía:

- Un conjunto de ecuaciones explícitas, en este caso definidas por las leyes de física básica.

- Un conjunto de parámetros definidos por longitud de separación de la cadena y el peso que se cuelga de la misma

Posteriormente otros muchos arquitectos, inspirados en la obra de Gaudí, han empleado las leyes de la física para construir otros modelos paramétricos. Entre todos los casos existentes se menciona, por su relevancia, al alemán Frei Otto, quien utilizaba películas de jabón para definir y optimizar superficies mínimas de láminas y membranas, estructurales (Figura 3).

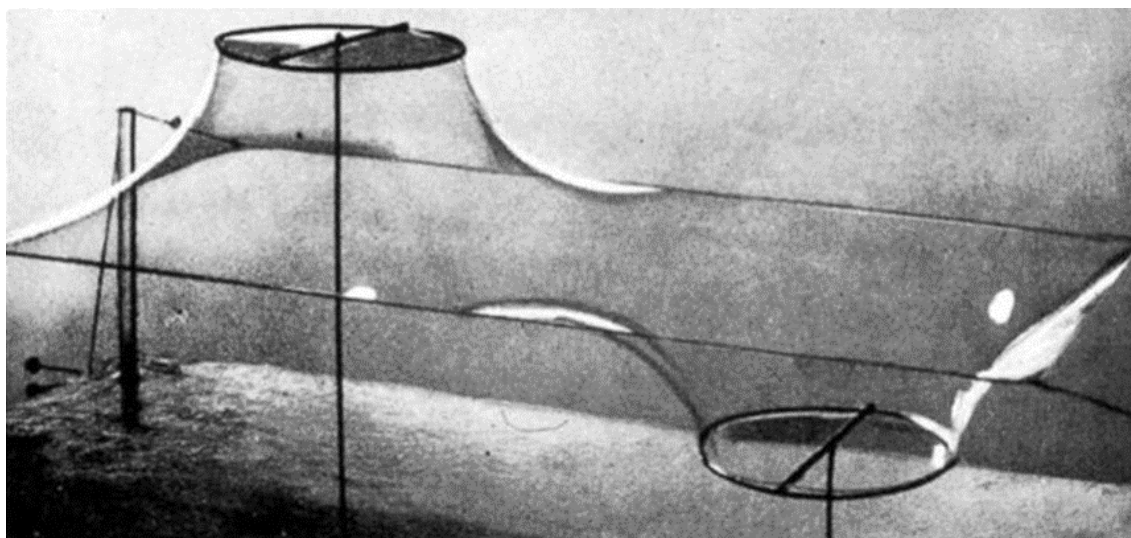


Figura 3. Modelo paramétrico de Frei Otto para representar láminas estructurales.

Por otro lado, en la década de 1960 surgió otra corriente dentro del mundo de la arquitectura, basada en la parametrización de una estructura, conforme a criterios de carácter arquitectónico, o ingenieril. Esta forma de realizar diseños paramétricos fue expuesta por primera vez por italiano Luigi Moretti en la XII Trienal de Milán celebrada en 1960. En este evento Moretti mostró distintas posibilidades de optimización de un estadio olímpico, en base a parámetros como el ángulo de visión de los espectadores o la minimización de los costes del hormigón.



Figura 4. Modelo paramétrico de Moretti expuesto en la XII Triennale di Milano.

### 2.2.2.3 SALTO A LAS COMPUTADORAS

La introducción de diseño paramétrico en las computadoras se produce de la mano del nacimiento del primer programa CAD de la historia, Skethpad. Este programa fue desarrollado por el ingeniero estadounidense Ivan Sutherland con el propósito de analizar la interacción hombre-computadora para su tesis, dentro del grupo de supercomputación del MIT, utilizando la mayor supercomputadora del mundo de la época, la TX-2.

Los resultados de la tesis, publicados en 1963, fueron una auténtica revolución, pues sentaron las bases de todos los programas CAD que han venido después. La influencia de Skethpad puede verse en funciones de programas CAD actuales, tales como:

- La interfaz gráfica intuitiva, con iconos que representa cada función.
- El zoom dinámico.
- La división del espacio de trabajo en una cuadrilla, adaptable según el zoom el empleado.
- Diversidad de geometría, aunque limitada al 2D, tales como, tales como: puntos, líneas, circunferencias y arcos de circunferencia.

Además, Sutherland incorporó un sistema de restricciones, llamadas atómicas, que permitían establecer ciertas relaciones como el paralelismo o la perpendicularidad, entre otros. Estas relaciones se mantenían en el dibujo al variar los parámetros de la geometría, hecho por el cual se considera a Skethpad también como el primer programa paramétrico. En la Figura 5 pueden verse algunas de estas restricciones.

	43 T point instance (point)	Point bears same relation to instance that (point) bears to its picture. GENERATED AUTOMATICALLY WITH INSTANCES
	33 L p thing p thing p thing	Three things are collinear. Note: no distinction made about ordering of variables. GENERATED AUTOMATICALLY WHEN POINTS ARE CREATED ON LINES
	22 C p thing p thing p thing	Distance from first to second is equal to distance from first to third. (First is circle center.) GENERATED AUTOMATICALLY WHEN POINTS ARE CREATED ON CIRCLES
	24 E 4 thing	Thing is erect or on its side. ↑ → ↓ ←
	27 H p thing p thing	First thing is directly above or below, or directly beside second thing. (Horizontal or vertical line.) GENERATED AUTOMATICALLY FOR ANY LINE BY HORV BUTTON
	30 I 4 thing p thing p thing	4 thing is "parallel" to line between p things. Parallel to horizontal line means upright. (To set angle of text.)

Figura 5. Ejemplos de restricciones de Skethpad.

El potencial de Skethpad, para realizar diseños paramétricos, pasó completamente desapercibido, porque ni Sutherland, quien nunca consideró a Skethpad como un programa paramétrico, ni las casas comerciales centradas en el desarrollo y mejora de los sistemas CAD, comprendieron la gran utilidad de estas funciones.

#### 2.2.2.4 MODELOS DIGITALES

Gracias a mejoras muy importantes en el ámbito de las computadoras, como; la aparición de las computadoras personales en 1981, los nuevos sistemas operativos, INUX y Windows NT, y las mejoras en los microprocesadores, los

sistemas CAD experimentaron una gran expansión entre las décadas de 1980 y 1990.

Como resultado de estas mejoras tecnológicas se desarrollaron programas CAD más potentes. Este es el caso de Pro/Engineer, destinado exclusivamente para la ingeniería mecánica. Este programa desde sus inicios en 1987 ofrece un sistema de representación completamente paramétrico, pero sin ninguna novedad respecto al sistema, desarrollado más de veinte años antes, con Skethpad.

Fruto del éxito de Pro/Engineer se desarrollan otros programas para otros campos; CATIA 4.0, que desde 1993 permite crear diseños paramétricos para aplicaciones de ingeniería aeronáutica e industrial, o Digital Project, desarrollado para uso interno del estudio de arquitectura de Frank Gehry en 1992 comercializado desde 2004.

Las principales características de esta nueva generación de softwares paramétricos son:

- Madurez en cuanto a la cantidad de distintas geometrías que se pueden representar, incluyendo funciones 3D muy potentes.
- Sistema paramétrico solo con control de los parámetros. Las ecuaciones paramétricas pasan a ser parte de la programación interna del sistema de representación.

Adicionalmente, durante esta etapa se desarrolla la programación orientada a objetos en entornos CAD. Aunque este tipo de programación permite definir una geometría en base a un determinado código, controlado por una serie de variables, no puede considerarse como un sistema paramétrico, pues carece de la inmediatez de estos sistemas al existir una importante curva de aprendizaje por parte de los usuarios.

#### **2.2.2.5 TENDENCIAS ACTUALES**

Recientemente en las últimas décadas se está empezando a extender el uso de los diseños paramétricos a otros sectores de las siguientes formas:



- Implementando sistemas de restricciones similares a las empleadas por Sketchpad. Esta es la solución de los programas CAD clásicos como AutoCAD, que desde 2010 incorpora esta funcionalidad.
- Desarrollando nuevos programas de representación gráfica que soportan la programación visual. Este el caso del nuevo software CAD y de los programas de representación gráfica empleados en la metodología BIM.

De cara a los intereses de este trabajo, solo se habla de los softwares del segundo tipo, basados en la programación visual, por ser estos los que más se emplean, hoy en día, para definir los modelos paramétricos.

El primer software de este tipo se empezó a comercializar en 2003 bajo el nombre de Generativa Components, actualmente integrado en el programa Acsen.

Generativa Components sirvió de base para los desarrollos posteriores que se hicieron, pues sus creadores de este programa han participado en el desarrollo del software posterior. Este el caso de Dynamo, lanzado al mercado en 2006 e integrado completamente en Revit desde 2013, y Grasshopper, comercializado en 2008 como parte del CAD Rhinoceros3D.

Las principales características de este tipo de programas son:

- La geometría se construye uniendo elementos predefinidos, o definidos por el usuario, que se definen en base a parámetros, generando un algoritmo continuo que crea todo el modelo.
- No se dibuja a la manera tradicional de los programas CAD. Operaciones como borrar o deshacer son completamente innecesarias, pues basta con eliminar partes del algoritmo.
- Pueden incorporarse otros programas, desarrollados por terceros, para ampliar las opciones del modelo. Entre estas nuevas funciones cabe destacar a la posibilidad de realizar análisis estructurales integrados.

- Integración directa en otros softwares o exportación muy sencilla. Este hecho hace que sea muy recomendable para proyectos en los que se emplea la metodología BIM o para impresión 3D.

## 2.3 INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA BIM

### 2.3.1 DEFINICIÓN

BIM (Building Information Modeling) es un nuevo acercamiento al diseño, construcción y gestión de infraestructuras y edificios con el fin de mejorar:

- La productividad en el diseño, mediante la optimización y control paramétrico, introduciendo estándares de ingeniería y reglas de validación de diseño.
- La calidad de la construcción, permitiendo identificar interferencias antes de comenzar las obras.
- La identificación de los riesgos e incertidumbres a lo largo de todo el ciclo del proyecto y un mejor conocimiento de las limitaciones y objetivos de este.
- La comunicación entre todas las partes implicadas y su acceso a toda la información.

De esta forma se logra reducir los costes y tiempos y se mejora la interoperabilidad a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto (Rosana, 2018).

En base a estas características puede definirse el BIM formalmente como el conjunto de metodologías de trabajo y herramientas caracterizadas por el uso de información de forma coordinada, coherente, computable y continua; empleando uno más modelos compatibles que contengan toda la información referente al edificio o infraestructura que se pretende diseñar, construir u operar (es.BIM, 2016).

### 2.3.2 CARACTERÍSTICAS

Para poder aplicar adecuadamente la metodología BIM es necesario conocer sus principales singularidades

#### 1.1.1.1 NIVELES DE MADUREZ

Para medir el grado de implantación de la metodología BIM en un proyecto se definen una serie de niveles. Estos niveles son:

- Nivel 0. En este primer nivel se incluye la información CAD de forma aislada por parte de las distintas disciplinas que intervienen en el modelo. Solo sirve para la producción de dibujos.
- Nivel 1. Se realizan modelos aislados 3D para cada una de las disciplinas del proyecto sin integración de la información.
- Nivel 2. Se genera un modelo único en el que toda la información va federada, junto con un modelo 3D, pero sin que exista un plan de mantenimiento de la información, que incluya: la estructura de los datos y los ficheros de intercambio de información admitidos.
- Nivel 3. Es el nivel más avanzado. Para alcanzar este nivel toda la información del proyecto está coordinada mediante ficheros estandarizados o bien integrada en un entorno común de datos. Permite consultas rápidas de la información a todas las partes involucradas.

#### 2.3.2.1 NIVELES DE DETALLE Y DESAROLLO

Un modelo BIM se desarrolla siempre conforme a los objetivos que busca el cliente, estableciéndose que elementos se modelan y cuáles no, en función de unos criterios estandarizados conocidos como LOD, que engloban dos significados diferenciados:

- Nivel de desarrollo (Level of Development) . Hace referencia a la cantidad de información relevante de un elemento respecto al total que posee. Es un criterio que hace referencia a la calidad e importancia de la información aportada.



- Nivel de detalle (Level of Detail). Solo indica el grado de información que tiene un elemento. No da muestras de la calidad de esta información.

Debe mencionarse que, aunque estos conceptos son distintos, están relacionados, porque si toda la información es relevante, los conceptos de nivel de detalle y desarrollo coinciden.

Actualmente existen varios países que plasman en sus normativas las distintas definiciones de LOD. Las normativas más empleadas son:

- PAS 1192-2: la normativa empleada en Reino Unido. Hace referencia a dos niveles; de detalle (LOD) y de información (LOI).
- G202-2013: publicada por el AIA (American Institute of Architects) en Estados Unidos. Establece una clasificación en función del nivel de desarrollo.

Para el desarrollo de este trabajo, solo se habla de los niveles de desarrollo (LOD) de la normativa americana, por ser esta normativa el marco de referencia que se emplea en este trabajo para fijar el nivel de desarrollo BIM. Estos niveles son:

- LOD 100. El concepto es visual, teniendo aproximadamente el 20% de la información. El objeto modelizado representa su apariencia física, sin contener ninguna información adicional. No hay datos geométricos ni dimensiones.
- LOD 200. Desarrollado esquemático, con un 40% de la información. El objeto posee dimensiones geométricas parametrizadas. Sirve para representar de forma aproximada un elemento en, tamaño, forma, ubicación y orientación.
- LOD 300. Elemento para construcción, teniendo el 60% de la información. El objeto modelizado, es representado de forma exacta en términos de cantidad, tamaño, forma ubicación y orientación. Pueden realizarse mediciones directamente del modelo.
- LOD 350. Análisis, interferencias y conexiones. El objeto modelado cumple con el nivel LOD300 y además se conecta con otros sistemas.

- LOD 400. Construcción, teniendo el 80% de la información. El elemento de modelo se representa gráficamente como un sistema, objeto o ensamblaje específico en términos de tamaño, forma, ubicación, cantidad y orientación con detalle. Se usa para la fabricación, montaje e información de la instalación.
- LOD 500. Elemento real, con el 100% de la información. El objeto modelizado, se encuentra ya construido, se ha medido y rectificado cualquier cambio respecto a las especificaciones.

#### 2.3.2.2 NIVEL DE INFORMACIÓN

Los modelos BIM se clasifican en función del grado de información que contienen, comúnmente llamadas dimensiones. En este caso los principales niveles existentes son:

- Dimensión tridimensional – BIM 3D: representa la generación del modelo virtual tridimensional, que incluye la posición, geometría e información de distintos elementos. Se usa para transmitir información a otros programas con el fin completar el diseño y verificar que cumple la normativa.
- Análisis de la programación temporal – BIM 4D: se añade la dimensión temporal a un modelo BIM 3D, permitiendo realizar simulaciones de las fases constructivas, planes de obra o ejecución.
- Incorporación de costes/presupuestos – BIM 5D: permite añadir a un modelo BIM 3D, las mediciones y los costes, para crear presupuestos. Se utiliza para realizar simulaciones económicas durante todo el ciclo de la vida del proyecto.

También existen otras dimensiones, que se están empezando a desarrollar paulatinamente, como; 6D, información de sostenibilidad, 7D, ciclo de vida y 8D, seguridad y salud.

#### 2.3.2.3 INTEROPERABILIDAD

Con el objetivo de garantizar el correcto intercambio de información, entre los distintos softwares usados por cada disciplina interviniente en el ciclo de un

proyecto BIM, se debe permitir la compatibilidad entre los distintos programas, buscando procesos colaborativos que estén mejor coordinados, dando lugar a lo que se conoce como OpenBIM.

Para lograr crear modelos conforme a los criterios OpenBIM, se emplean los ficheros de intercambio de información estandarizados. Aunque existen multitud de este tipo de ficheros, el que mejor resultado da y más se emplea, debido a su gran compatibilidad, es el IFC (Industry Foundation Classes).

El flujo de trabajo con el formato IFC es completamente análogo al expuesto con la metodología BIM. De esta forma todos los archivos y documentos se almacenan y actualizan en un servidor o espacio compartido. Posteriormente esta información sirve para realizar los documentos técnicos del ciclo de vida de la infraestructura.

## 2.4 LOS PUENTES ARCOS DE JUAN JOSE ARENAS

Al investigar la obra de Juan José Arenas, rápidamente puede apreciarse que la mayor parte de sus puentes más destacados han sido puentes arco. Por este motivo es este apartado se ha decidido:

- Comentar las principales características de sus puentes arcos y su evolución cronológica.
- Realizar una breve descripción de cada una de estas estructuras.

### 2.4.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Los puentes arcos de arenas se caracterizan por:

- El rango de luces va desde 50 hasta 384 metros lo cual parece indicar una cierta preferencia por el puente arco ya que las luces menores y mayores se podrían haber resuelto, respectivamente, mediante soluciones de puentes viga y atirantados.
- No existe una clara preferencia por una tipología de puente arco, arcos de tablero superior intermedio o inferior, también llamados bow string, se

reparten indistintamente en la obra de Arenas en función de los condicionantes de cada proyecto.

- En cuanto al valor de la flecha de sus arcos, puede apreciarse que existe una clara evolución hacia aros más rebajados. Los primeros arcos son en general apuntados, con relaciones flecha luz de  $1/3$ , mientras que en los últimos las relaciones flecha luz son menores a  $1/6$ .
- Del estudio del canto de sus arcos se puede intuir una cierta tendencia hacia los arcos de canto constante. Esto es habitual en los puentes arco de tablero inferior, pero no tanto en los puentes arcos de tablero superior.
- Este hecho lleva a Arenas con cierta asiduidad a arcos laminares, también llamados delgados, buscando seguramente una esbeltez visual de carácter estético, pero garantizando la suficiente rigidez y resistencia a través del aumento del ancho de estos elementos (en vez de su canto).

A continuación, se recopila todos los puentes arco de Juna José Arenas, por orden cronológico, teniendo en cuenta sus distintas tipologías, materiales, dimensiones y relaciones geométricas. La información que figura en la Tabla 1 es la siguiente:

- El año de construcción, salvo en los casos de los viaductos de Roma y Golbardo.
- El tipo de arco por la posición de su tablero; inferior (inf), intermedio (int) y superior (sup).
- El material tanto del arco como del tablero; hormigón (hor), acero (ac), mixto (mix).
- La luz del puente (L) y su flecha, indirectamente a través de la relación flecha luz ( $f/L$ ).
- Los cantos en los arranques y claves, expresado a través de las relaciones canto-luz.
- La separación entre pilas o entre péndolas (d).

- El canto del tablero en función de la relación canto tablero-luz.

Puente	Año	Tipo	Traf.	Arco	Tab.	L (m)	f/L	h/L (arr.)	h/l (clav.)	d (m)	htab (m)	htab/L
Oblatas	1992	inf.	carr.	hor.	hor	50	1/3,3	1/83.	1/83	2.3	2.8	1/18
Barqueta	1992	inf	carr	ac	ac	168	1/5.6	1/93	1/93	8.5	2.40	1/70
Regenta	1996	sup	carr	hor	mix	194	1/4	1/46	1/80	18.2	1.80	1/108
Morlans	1996	sup	carr	hor	hor	90	1/5.2	1/90	1/90	12.9	1/50	1/60
Barrial	1999	int	carr	ac	mix	83	1/4.9	1/50	1/92	5	1.25	1/53
Roma	1999	int	carr	ac	mix	180	1/8.1	1/81	1/81	4.8	4.70	1/28
Hoznayo	2003	inf	carr	ac	mix	60	1/8	1/120	1/120	4	1.33	1/45
Zaragoza	2008	inf	carr	hor	hor	216	1/6	1/120	1/120	6	2	1/108
Las Illamas	2011	inf	carr	hor	hor	102	1/7	1/50	1/83	2.4	2.25	1/27
Almonte	2016	tab	ferr	hor	hor	384	1/6	1/61	1/91	42	3.10	1/124
Golbardo	2017	sup	carr	ac	mix	60	1/10	1/100	1/100	4.5	1.43	1/42

Tabla 1. Principales características de los puentes arcos de Arenas.

## 2.4.2 BREVE DESCRIPCIÓN DE CADA PROYECTO

En este apartado se busca exponer con más grado de detalle cada uno de los proyectos de Arenas, siguiendo un orden cronológico.

### 2.4.2.1 Oblatas

Se trata de un arco atirantado, Figura 6, de 50m de luz, el más apuntado de los que proyectó Juan José Arenas y con un canto muy reducido que se combina con un tablero de gran canto (2.80 m, 1/18 de la luz) que se justifica en parte por la gran anchura del puente (27.70 m).

El puente se caracteriza por contar con un tablero con un gran núcleo central, que actúa como elemento principal para resistir torsiones, y el arco de tipo laminar, con la singularidad de ser de ancho variable, para resistir las cargas permanentes.



Figura 6. Puente de las Oblatas

Este puente es un claro ejemplo donde se observa que los criterios estéticos se han tenido muy en cuenta en la solución final, y que se han compatibilizado con los criterios meramente estructurales.

#### 2.4.2.2 Barqueta

Ésta es posiblemente una de las obras cumbre de Juan José Arenas, y de Marcos Pantaleón, siendo un símbolo de la Expo 92 y de toda la ciudad de Sevilla, Figura 7, Este puente se basó en un diseño brillante que combina:

- Funcionalidad; se evita que en arco aterrice la mediana del tablero, problema común a los puentes arco atirantados, al centro ya que la mediana debe tener al menos la anchura del arco, y éste la necesaria para evitar la inestabilidad lateral. En este caso el arco queda suspendido en el aire, soportado por dos pórticos triangulares que salvan el tráfico y transmiten al tablero las componentes horizontales de sus esfuerzos axiales.



- Estética; conseguida por la ligereza y por el perfecto diseño de las uniones entre los distintos elementos del puente; en este apartado no hay que olvidar el papel que juegan la inclinación variable de las péndolas ya que sus anclajes distan unos de otros 8.5 m en el tablero y 6.75 m en el arco.
- Eficiencia estructural; conseguido mediante el adecuado uso del acero como material para reducir las cargas a las riveras del Guadalquivir, el diseño de las secciones transversales, con rehundidos en las caras del aro y de los pórticos triangulares para rigidizar el arco frente la abolladura, y el diseño del tablero para soportar por sí mismo, sin contar con el arco los esfuerzos de torsión.



Figura 7. Puente de la Barqueta.

También debe comentarse el procedimiento constructivo, pues condicionó el diseño integral del puente, para poder realizar esta singular obra en los ajustados plazos marcados por las fechas de las Expo.

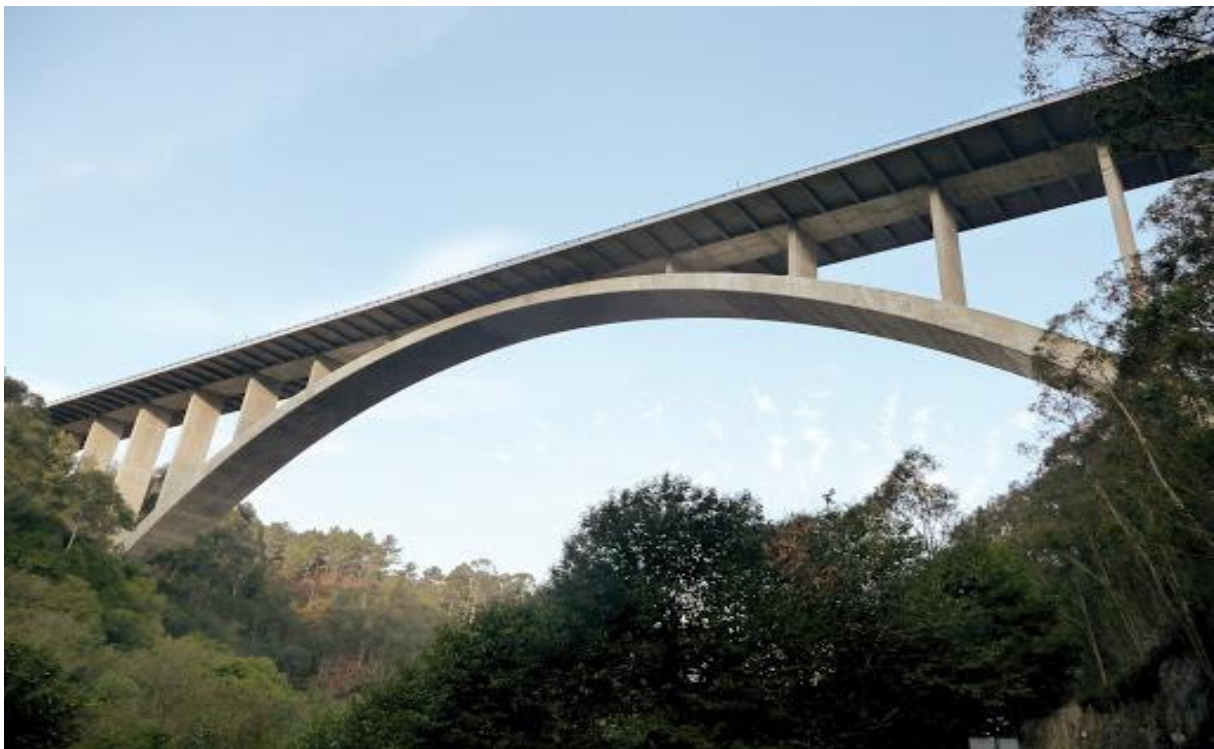
#### 2.4.2.3 Regenta

El puente de la Regenta, Figura 8, que obtuvo el Premio Puente de Alcántara tuvo una enorme importancia en el desarrollo de los puentes arco de tablero superior en España ya que, con una luz de 194 m, retomaba la tradición de

puentes como el Martín Gil que han sido una referencia para los constructores de puentes españoles.

En su proyecto se tuvieron en cuenta de forma decisiva los criterios estéticos y paisajísticos, preocupación constante en Juan José Arenas, y criterios constructivos.

Aunque el Arco del Regenta se trata de una concepción muy clásica para un puente arco, supuso un punto de inflexión para el desarrollo de otros puentes de la misma tipología pues fue el primer puente arco construido en España mediante voladizos sucesivos con un sistema de triangulación provisional.



**FIGURA 8. PUENTE DE LA REGENTA.**

En relación con sus características técnicas, sin entrar en mucho detalle por abordarse a continuación, debe destacarse que es un puente muy alto, relación flecha-luz  $1/3.8$ , al ser el valle que cruza el puente muy profundo. En relación con el arco puede decirse que presentar un canto en clave menor de la media y ligeramente mayor que la media en arranques.



#### 2.4.2.4 Morlans

El puente del Valle de Morlans (Figura 9) en San Sebastián aun siendo de una luz de 90 m, reúne características muy notables:

- En primer lugar, se trata del primer puente de Arenas que opta claramente por definir la directriz del arco como el antifunicular de las cargas permanentes y por esta razón llega a un trazado poligonal.
- Por otra parte, dicho trazado se ve condicionado por la gran pendiente del tablero, 8.6%, lo cual obliga fijar los apoyos del arco a distinto nivel.
- Se trata de un arco de canto constante, hecho relativamente poco frecuente en puentes de tablero superior, lo que lo convierte casi en un arco laminar.
- Otra característica para destacar es la descomposición del arco y de las pilas en dos mitades, recurso clásico en arcos de tablero superior.
- Las pilas son de canto variable para lograr un mejor encaje paisajístico en el valle, pues un puente continuo sobre pilas verticales era perfectamente posible al construir el arco mediante cimbra apoyada en el terreno.



FIGURA 9. PUENTE DE MORLANS.

#### 2.4.2.5 Barrial

El puente sobre la A6 en Madrid a la altura del Barrial, Figura 10, es la primera incursión de Juan José Arenas en la tipología de puente arco de tablero intermedio.

En este caso el elemento más condicionante fue la construcción evitando interrumpir el tráfico de la A6 y, y en menor medida el dar una imagen al puente de puerta de entrada a la ciudad.



**FIGURA 10. PUENTE DEL BARRIAL**

Se trata de un puente complejo, no solo por usar secciones mixtas para el tablero, sino porque la composición de estos elementos va cambiando en siendo longitudinal de puente. De esta forma los arranques quedan materializados con hormigón, sobresaliendo por encima del tablero, pasando el arco estar compuestos por perfiles metálicos soldados y péndolas del mismo material.

#### 2.4.2.6 Roma

El “Ponte dei Congressi” en Roma supuso el primer proyecto internacional de Arenas ya que se trata de la propuesta ganadora de entre 52 participantes en el concurso convocado por el Ayuntamiento de Roma para salvar el Tíber.



Se trata de un puente arco de tablero intermedio, con una luz de 180 m en el que el arco es también de acero por encima del tablero prolongándose con unos jabalcones de hormigón. En este caso el elemento más característico es una compleja celosía con condones superior e inferior de hormigón y diagonales de acero, Figura 11.



**FIGURA 11. PUENTE DI CONGRESI. SOLUCIÓN INICIAL**



**FIGURA 12. PUENTE DI CONGRESI. SOLUCIÓN ACTUAL.**

Este proyecto es prácticamente simultáneo con el del puente del Barrial, pero es en cierto modo heredero del puente de las Oblatas en Pamplona, pues consta de un tablero muy ancho, 34,50 m de luz (canto tablero-luz 1/28) por lo que al igual que este el tablero actúa como elemento rigidizador permitiendo construir un arco muy esbelto laminar (relación canto-luz 1/81).

Este proyecto nunca llegó a construirse. Ahora, más de quince años después se ha retomado el proyecto inicial, Figura 12.

#### 2.4.2.7 Hoznayo y Villaverde

Estos dos puentes son arcos de tablero inferior de 60 m de luz de arco metálico y tablero mixto. En estos proyectos el uso de los materiales se hace en función de conseguir la mayor limpieza y transparencia de la estructura, para lo cual se inclinan ligeramente hacia el exterior los planos de los arcos y las péndolas se materializan mediante pletinas que se sueldan al arco y a las vigas del borde del tablero, como puede verse en las Figura 13 y Figura 14.



FIGURA 13. PUENTE DE HOZNAYO.



**FIGURA 14. PUENTE DE VILLAVERDE.**

Los arcos y las vigas de borde se diseñan con los rehundidos mencionados anteriormente en el caso del puente de la Barqueta. Hay que destacar en este puente la extrema esbeltez de la sección del arco: 0.50 m de canto lo que representa 1/120 de la luz.

#### **2.4.2.8 Tercer Milenio**

El puente del Tercer Milenio en Zaragoza, Figura 15, es heredero del puente de la Barqueta, aunque sus condicionantes son diferentes y las soluciones adoptadas también lo son. Las principales diferencias que presenta este puente respecto al de la Barqueta son:

- Los condicionantes en cuanto a su luz y anchura de tablero de 216 m y 43 m respectivamente.
- Tanto el arco como el tablero son de hormigón. La elección del material hormigón se justifica por la voluntad de disminuir las vibraciones que se podrían producir en un puente de esta tipología con una luz y una anchura tan elevada.
- El anclaje de las péndolas se realiza en los bordes del tablero, en lugar de, en la mediana, y tanto en el arco como en los puntales extremos. De esta



forma las péndolas se mantienen en planos inclinados, a diferencia del diseño de la Barqueta.

- Los pies de apoyo del arco se completan con una riostra transversal situada cerca del nudo de unión del arco con dichos pies
- El procedimiento constructivo. En este caso se construyó el puente mediante empuje y el arco sobre cimbra ya que el peso del conjunto hubiera hecho imposible el transporte del puente completo como se hizo en la Barqueta.



**FIGURA 15. PUENTE DEL TERCER MILENIO.**

Es de destacar la extrema esbeltez del arco pues su canto es de 1.8, siendo por tanto su relación canto-luz de 1/120. También igual de sorprendente es la elevada esbeltez del tablero, pues con un canto de 2 m su relación flecha luz es de 1/108. En este caso debido a las elevadas esbelteces de ambos elementos fue necesario ajustar al extremo la forma de estos elementos para optimizar su trabajo conjunto.

#### 2.4.2.9 Vaguada de las Llamas

El puente sobre la Vaguada de las Llamas de Santander, Figura 16, es el último puente arco de tablero intermedio proyectado por Juan José Arenas y lo hizo para su ciudad de adopción, la cual le dio su nombre como homenaje a su labor como ingeniero, empresario y profesor.

Se puede considerar que el puente de las Llamas una vuelta a las proporciones clásicas con un arco de canto variable, aunque bastante alto pues presenta una relación flecha luz de  $1/7.8$  para una luz de 102 m. No obstante, también presenta detalles novedosos como son:

- La concepción del arco como como dos arcos, solidarizados a lo largo de la mayor parte de su recorrido por encima del tablero y que se separan para dejar sitio a una vía para bicicletas.
- El apoyo de los pies del arco sobre rótulas metálicas que permiten prolongar estos pies hasta la cimentación situada 8 m por debajo del terreno natural, de tal forma que la luz total de arco se calcula entre los puntos de apoyo de los pies enterrados.



FIGURA 16. PUENTE DE LA VAGUADA DE LAS LLAMAS.

En el tablero, basado en la misma idea que se desarrolló para el puente de las Oblatas. La solución original para la construcción de los vuelos que soportan las dos calzadas, basadas en la prefabricación del intradós de dichos vuelos y el hormigonado sobre prelosas del extradós.

#### 2.4.2.10 Almonte

El viaducto sobre el río Almonte, es la conclusión a un largo viaje que comenzó con el puente de la Regenta. Este puente presenta una luz de 384, siendo el tercer puente arco de hormigón con tablero superior de mayor luz del mundo, y el primero si se considera el tráfico ferroviario de alta velocidad, siendo una de las mayores obras que se han desarrollado en España en los últimos años.

Este puente presenta unas dimensiones clásicas para su tipología, aunque al igual que Barqueta y el Tercer Milenio se bifurca al arco en su parte inferior, uniéndose en su parte central para conseguir mayor estabilidad fuera del plano, así como para mejorar las resistencias frente a las acciones transversales. Es probable que alguna de estas decisiones influyese los problemas de vibraciones experimentados por el puente de Alconétar situado también sobre el Embalse de Alcántara.



FIGURA 17. PUENTE DE ALMONTE.



La unión solidaria entre arco y tablero en clave definiendo por lo tanto este punto como el punto fijo del puente ante las acciones de frenado y arranque, así como ante las deformaciones de fluencia, retracción y temperatura hace que las longitudes dilatables apenas sobrepasen los 500 m por lo que las juntas de dilatación situadas en ambos estribos son convencionales y la transmisión de las acciones longitudinales se realice de forma natural al arco.

#### 2.4.2.11 Golbardo

EL nuevo puente de Golbardo será ya una obra póstuma de Juan José Arenas. Se trata de un puente que se superpone a un antiguo puente de Ribera al que rinde homenaje con una tipología de arco que se conjuga excelentemente con éste (Figura 18).

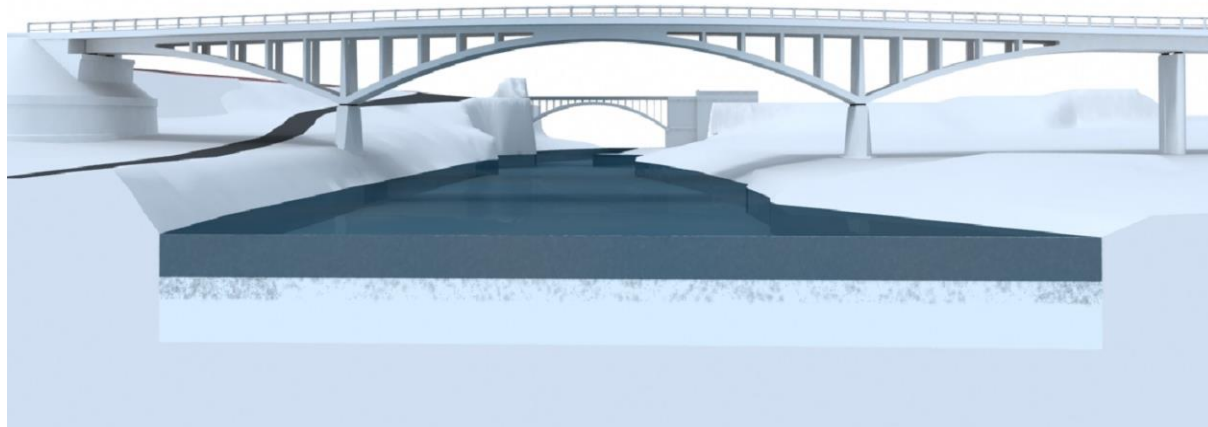


Figura 18. Alzados tridimensionales del antiguo y nuevo puente de Golbardo.

El puente de Ribera, segundo puente de hormigón armado de España tiene una luz de 30 m con un arco bastante rebajado, presentando una relación flecha luz de 1/10, y muy esbelto para la época, relación canto-luz en la sección de 1/50, que se apoya en un lado al terreno rocoso y en otro a un estibo de mampostería que funciona por gravedad.



**FIGURA 19. NUEVO PUENTE DE GOLBARDO.**

El nuevo puente, Figura 19, no es propiamente un arco sino más bien una viga Vierendeel de canto variable, compuesta por un arco metálico y un cajón mixto de tres vanos con un vano central de 60 m y que se sitúa a 100 m aguas abajo del puente de Ribera. Se mantiene en el puente nuevo el mismo rebajamiento del arco de  $1/10$  aunque se aumenta su esbeltez en la sección a  $1/100$  de la luz.

## 3 EL PUENTE ARCO DE LA REGENTA

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El Puente Arco de la Regenta, actualmente viaducto Pintor de Fierros, es sin lugar a duda una construcción de una inigualable calidad estética y estructural, que la hicieron merecedora del V Premio Internacional Puente del Alcántara.

Con el fin de comprender mejor la estructura, sus elementos, y características, se habla en este capítulo de:

- **UBICACIÓN:** contextualiza el marco del proyecto de esta estructura, así como su finalidad.
- **DESCRIPCIÓN DEL VIADUCTO:** se describen los distintos elementos del viaducto con especial énfasis en cuanto a su tipología estructural y geometría.

### 3.1 UBICACIÓN

El Arco de la Regenta forma parte del conjunto de viaductos correspondientes al tramo de Novellana a Cavadeo de la actual AP-8, originalmente N-632, la cual discurre por el oeste del Principado de Asturias.

Debido a la abrupta orografía de la zona, existen nueve viaductos en este tramo, entre ellos el citado puente de esta investigación, que sirve para salvar el río Cabo, en las cercanías de las poblaciones de Ballota y Tabizo.

### 3.2 DESCRIPCIÓN DEL PUENTE

#### 3.2.1 JUSTIFICACIÓN DE LA TIPOLOGÍA

El valle del citado río Cabo presenta un perfil en v con inclinaciones respecto a la horizontal entre 30 y 45 grados, generando la traza de la carretera una brecha de 380 m. El terreno portante de la zona se compone por pizarras y rocas cuarcíticas capaces de soportar empujes oblicuos. (Arenas, y otros, 1997).

Como consecuencia de los concionantes geométricos, geotécnicos y del encaje funcional y estético del puente, en el valle, se consideró como la solución óptima, realizar un puente arco de hormigón de tableo superior. El motivo por el cual se decidió esta solución fue por las claras ventajas en cuanto a resistencia, deformabilidad, durabilidad y estética respecto al resto de tipologías de puentes de hormigón.

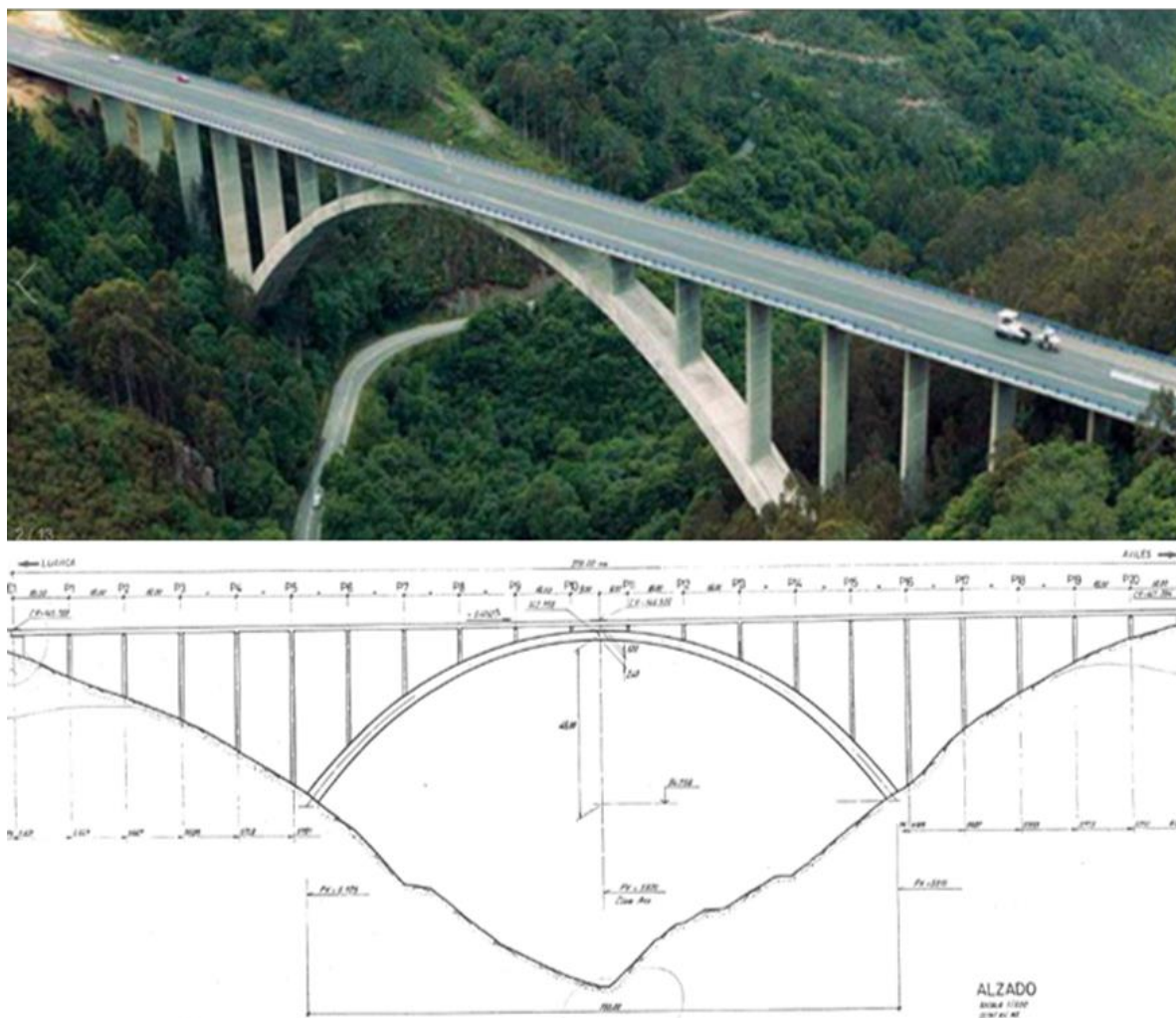


Figura 20. imagen tras finalizar la construcción y alzado general

El viaducto se concibió como un puente recto de 381,6 m de luz materializado por 21 vanos de 18,2 m, siendo soportados los 11 vanos centrales por el propio arco, existiendo por tanto 10 pilastras o montantes que nacen del arco.

Aunque el puente se diseñó para una carretera nacional, se concibió para que pudiese ser ampliado fácilmente. La decisión de permitir esta ampliación es un hecho de vital importancia pues, como puede verse en el apartado 3.2.2.3, condicionó el tipo de tablero.

### 3.2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS

#### 3.2.2.1 ARCO

El elemento arco tiene una luz de 190 m y una flecha de 50 m, situándose su relación flecha/luz de los arcos peraltados, Su directriz se define mediante 5 curvas circulares, 3 por semiarco, de radios de 110, 135 y 175 m. La elección de este tipo de directriz se realizó con el objetivo de ajustar el trazado del arco, al antifunicular de las cargas de peso propio (Arenas, y otros, 1997).

EL hecho de realizar el arco de hormigón armado se debe a las claras ventajas que presenta este material trabajando a flexo compresión, ideal para un arco diseñado para trabajar como un antifunicular. Además, el uso del hormigón tiene las ventajas de que el arco construido es menos deformable.

Para el diseño del arco se optó por una solución de tipo cajón bicelular, cuyas dimensiones exteriores son; 10,5 m de ancho, constante y canto variable, comprendido entre los 4,2 m de los arranques a los 2,40 m en la clave. Respecto a los espesores estos son; constantes de 0,40 m, en el caso de las almas y variable entre 0,30 y 0,24 m, para las tablas.

#### 3.2.2.2 PILAS

El diseño de las pilas se realizó buscando minimizar el peso propio de estos elementos sobre el arco, garantizando al mismo tiempo su informalidad estética en el conjunto.

Estos elementos se componen de una sección maciza de 6,50 m de ancho, en sentido transversal al puente, y cantos de; 0,80 m para las pilas sobre el arco, 1,20 m para las pilas ubicadas en los arranques del arco y 1 m para el resto. La variación de los cantos de las pilas se realizó con el fin de dotar a estos



elementos de suficiente flexibilidad y así minimizar la contribución de los esfuerzos de retracción y térmicos.

Las pilas que nacen sobre el arco lo hacen desde unos diafragmas internos que macizan el arco una determinada longitud. Estos elementos cuentan con pasos de hombre, para que sea posible la inspección del interior del arco.

El resto de las pilas presentan una cimentación directa, mediante zapatas al terreno.

Todas las pilas están conectadas al tablero por apoyos, aunque estos son diferentes para cada pila (García-Arango Cienfuegos-Jovellanos, Fernández-Nespral Pérez, Pantaleón Prieto, & Ramos Gutiérrez, 2009), de modo que debe distinguirse entre:

- Apoyos de neopreno confinado tipo POT PF500: colocados en las pilas de mayor altura, las que nacen sobre los arranques del arco y en los vanos de aproximación. Su objetivo de reducir movimientos relativos de estas con el tablero.
- Aparatos de deslizamiento multidireccional PU-500 y de desplazamiento unidireccional PL-500: ubicados en las pilas más próxima a los estribos inicial y final, respectivamente, siguiendo el sentido de avance de la traza.
- Aparatos de neopreno zunchado: presentes en el resto de las pilas, de menor altura, que gravitan sobre el arco.

### 3.2.2.3 TABLERO

El tablero se diseñó como un cajón mixto de hormigón-acero con el fin de permitir su ampliación (Figura 21), de la manera más sencilla y económica posible. La sección tipo definidas en ambas situaciones son:

- Sección sin ampliar: compuesta por un cajón metálico de 6,50 m de ancho y una losa superior de hormigón, de 12 m de ancho y canto variable entre 0,40 y 0,25 m. Este tablero estaba compuesto por dos carriles de circulación, uno por sentido, más arcenes.

- Sección ampliada: similar a el mismo cajón del caso anterior, al que se añadieron jabalcones metálicos de 7,75 m de largo, soldados a las almas existentes, en aquellas secciones, que ya contaban con marcos cerrados. Adicionalmente se dispusieron dos pequeñas vigas metálicas longitudinales, soldadas en los extremos de los jabalcones de 0.5 m de ancho y 0.3 m de canto, para solidarizar la losa de hormigón en sentido longitudinal y mejorar de este modo el reparto de las cargas excéntricas.

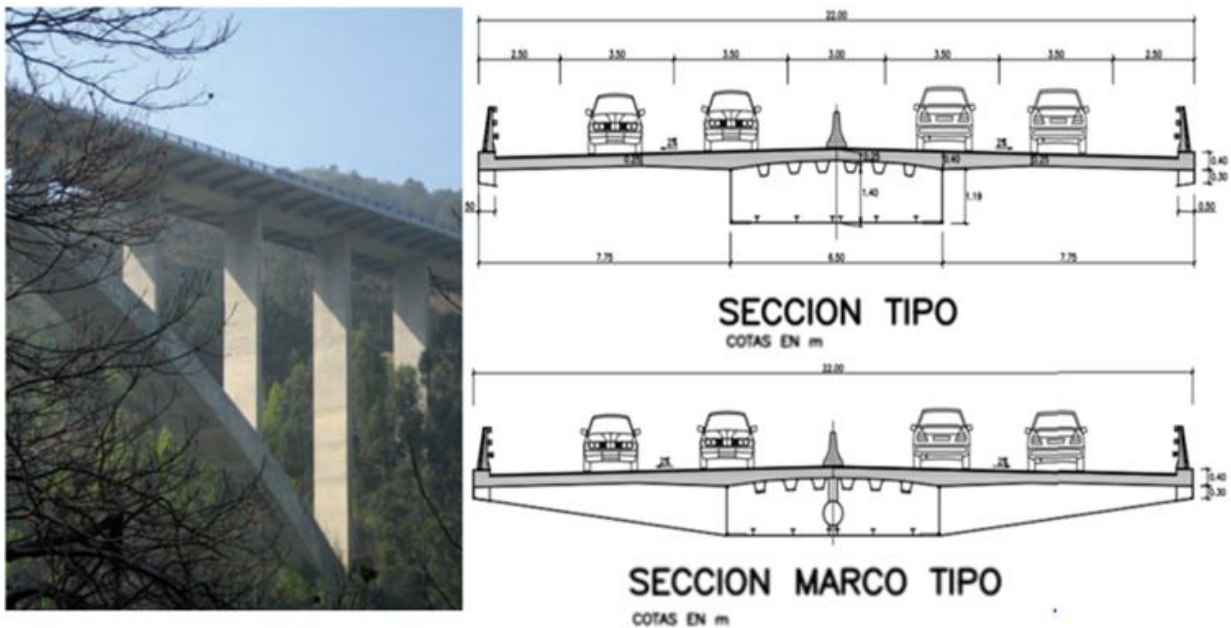


Figura 21. Detalle del tablero ampliado y secciones tipo.

#### 3.2.2.4 ESTRIBOS

Los estribos son cerrados y cuentan con caras curvas que facilitan la transición entre las tierras de los terraplenes aledaños y la estructura. El apoyo del tablero sobre estos elementos se realiza mediante aparatos de apoyo POT de tipo PU-300 y PL-300, para los estribos izquierdo y derecho, conforme al sentido de avance de la traza.



## 4 MODELO PARAMÉTRICO

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe una clara tendencia a incorporar diseños paramétricos en el software empleado para la metodología BIM, motivo por el cual conviene realizar una breve introducción a esta metodología.

### 4.2 INFORMACIÓN DEL MODELO

#### 4.2.1 NIVELES BIM

Antes de comenzar con la generación del modelo se deben fijar los objetivos de implantación del BIM que se buscan alcanzar. Conforme a lo expuesto en el apartado 2.2.1 las características que se buscan alcanzar son:

- Nivel de madurez: se fija como objetivo un Nivel 2. La interconexión del modelo se genera usando el formato IFC al ser actualmente la forma más empleada a nivel profesional para efectuar el intercambio de información. para realizar esta operación.
- Nivel de desarrollo: conforme a la normativa G202-2013 se establece un nivel global para todo el modelo y para cada uno de los elementos que lo integran LOD350.
- Nivel de información: solo se pretende trabajar con información geométrica y propiedades estructurales, por lo cual se trata de un modelo BIM3D.

#### 4.2.2 SOFTWARE

##### 4.2.2.1 DISEÑO PARAMÉTRICO

De cara a la elaboración del modelo se pensó inicialmente en dos softwares: Grasshopper y Dynamo, los cuales son dos de los programas que más se emplean actualmente.

Tras valorar detenidamente ambas opciones se optó por usar Grasshopper, por las siguientes ventajas:

- Permite la interconexión con más software. Dynamo solo vale para trabajar con programas de la casa comercial AutoCAD.
- Pueden realizarse modelos integrados. No es una simple herramienta para definir geometrías y propiedades de los elementos como Dynamo.
- Menor curva de aprendizaje. Se tiene un mejor control visual y conceptual del algoritmo que se está generado, facilitando el uso a los usuarios.

#### 4.2.2.2 EXPORTACIÓN

Con el fin de realizar la exportación del programa de diseño paramétrico de la manera más sencilla y rápida posible, se ha optado por crear un modelo integrado con Karamba3D, software que funciona como un plugin en el entorno de Grasshoper.

#### 4.2.3 IDEALIZACIÓN

##### 4.2.3.1 LIMITACIONES

Es importante mencionar que para la definición del modelo paramétrico se han empleado un conjunto de planos que difieren con el puente construido. Estas discrepancias se deben a que los planos analizados son de una versión previa del puente. Los cambios detectados son:

- Arco: en lugar de tener un ancho de 10,5 m presenta un ancho de 9,5 m.
- Pilas: el apoyo del tablero en las pilas se realiza directamente, sin aparatos de apoyos, salvo en los estribos y en la primera pila más próxima a los extremos del arco.
- Tablero: se trata de una losa aligerada de hormigón pretensado de 12 m de ancho superior y 6,5 de ancho inferior con un canto constante de 1.3 m.

Estos cambios afectan al comportamiento estructural del puente, principalmente a los esfuerzos asociados de peso propio, alejándolo de la realidad. No obstante, se considera que su efecto no afecta a los objetivos fijados en este trabajo, ya que el procedimiento de desarrollo del trabajo no varía.

## 4.2.3.2 SIMPLIFICACIONES

Con el fin de reducir ligeramente la complejidad del modelo se establecen una serie de simplificaciones de la realidad, que afectan a los siguientes elementos:

- Arco: se aproxima la directriz compuesta por cinco curvas circulares a una única parábola de segundo grado, curva que también se aproxima mucho al antifunicular del peso propio y presenta pocas discrepancias con la directriz real (Figura 22). Se asume que la variación de los cantos es parabólica.
- Pilas: se considera la misma sección transversal para todos los elementos. Las dimensiones de esta sección son 6,5 m de ancho y 1 m de canto. Por otro lado, para todas las cimentaciones, se toma un canto de 2 m, en lugar de estar de 1,5 o 2 m.
- Tablero: se emplea la misma sección transversal para todos los aligeramientos del tablero. La sección transversal de los aligeramientos está formada por cuadrados de 0.9 m de lado con chaflanes en sus cuatro esquinas a 45 grados de 0,20 m.
- Estribos: se prescinde de incorporarlos al modelo paramétrico, ya que no tienen una influencia significativa de cara al análisis estructural.

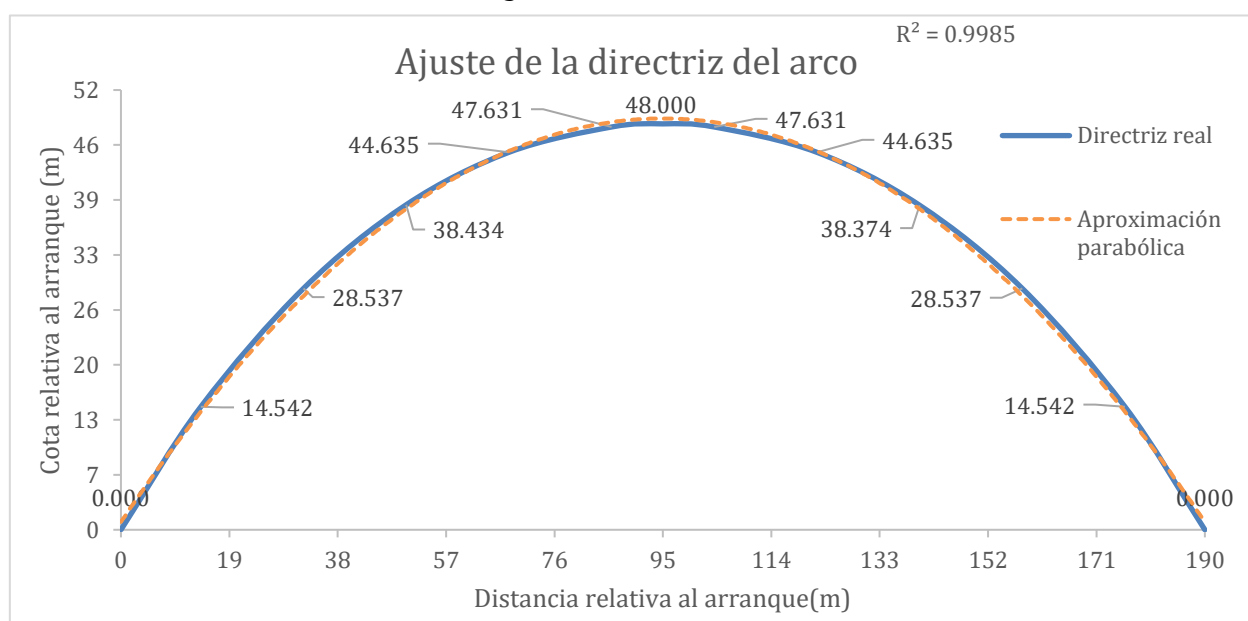


Figura 22. Bondad del ajuste parabólico de la directriz.

Se considera que estas simplificaciones son perfectamente asumibles, dada su acotada influencia y el carácter académico del trabajo.

## 4.3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

### 4.3.1 GEOMETRÍA

#### 4.3.1.1 ARCO

Para generar el elemento arco en primer lugar deben definirse los parámetros básicos de la directriz parabólica (Figura 23 y Figura 24); su luz (L) y su flecha (f).

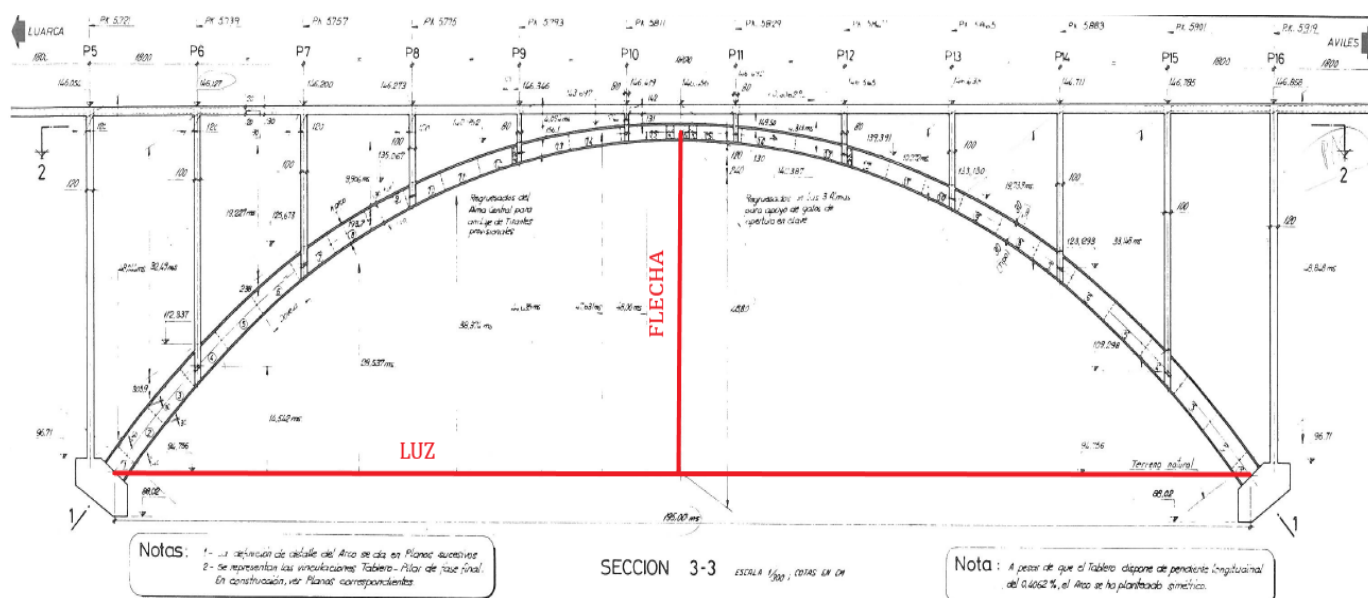


Figura 23. Parámetros del arco.

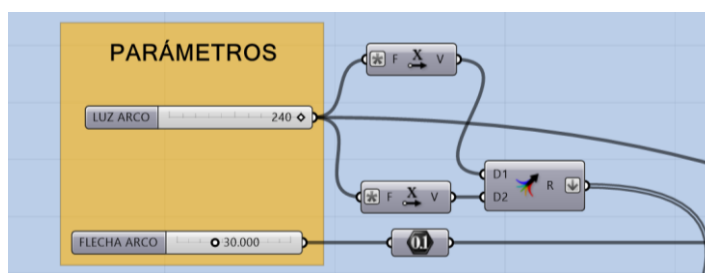


Figura 24. Definición de los parámetros del arco.

Conocidos los parámetros que permiten representar una parábola debe realizarse el encaje de la luz en el terreno, porque es fundamental definir la cota a la que se sitúan los arranques ( $y_0$ ) para poder definir la directriz del arco según la ecuación (1).

$$y = -\frac{4f^2}{L^2}x^2 + \frac{4f}{L}x + y_0 \quad (1)$$

El primer paso del encaje de la luz consiste en generar el terreno mediante una polilínea. Este elemento se ha generado en Rhinoceros3D, a partir de las coordenadas que se conocen del terreno. Posteriormente se ha asimilado en una variable en Grasshoper, para que no sea necesario volver a incorporar la polilínea cada vez que se abre el fichero del modelo.

Realizada la operación descrita en el párrafo anterior, se extruye la polilínea del terreno una determinada distancia a ambos lados del terreno para generar una superficie 3D (Figura 25).

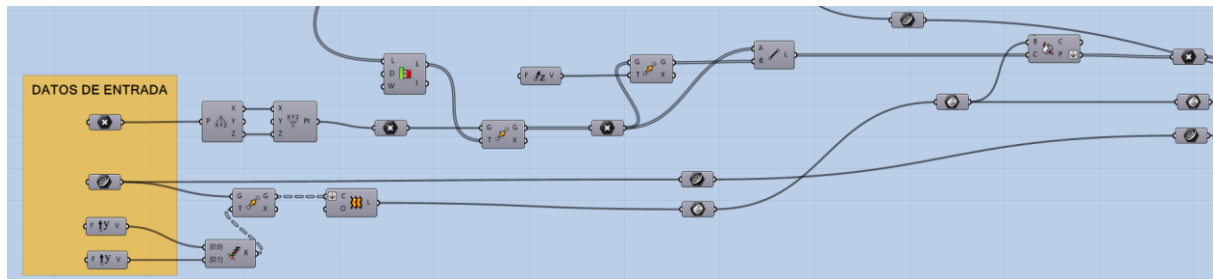


Figura 25. Creación del terreno 3d.

A continuación, se realiza el encaje de la luz en el terreno con una línea y se divide está en 12 puntos, a los cuales se les asignan cotas según la ecuación de la directriz previamente definida, Ecuación (1). Al mismo tiempo se acotan los siguientes valores límite de las siguientes variables:

- Flecha máxima disponible: esta variable se obtiene midiendo la distancia vertical entre el punto medio de la luz del arco y el fondo del tablero, restando 1,5 m de resguardo. Con esta restricción se asegura que todos los modelos generados son puentes arco de tablero superior.
- Rango de la relación flecha-luz: se limita el rango de valores de esta relación, Ecuación (2) conforme a los criterios estructurales explicados en el apartado 5.3.1. Esta limitación se establece con el fin de construir modelos dentro de un rango habitual en la práctica ingenieril.

$$0.1 \leq \frac{f}{L} \leq 0.3 \quad (2)$$

Una vez que se han acotado los valores de límites del arco y se tienen los puntos que forman la directriz, se unen estos mediante una polilínea de segundo grado para materializar la directriz (Figura 26).

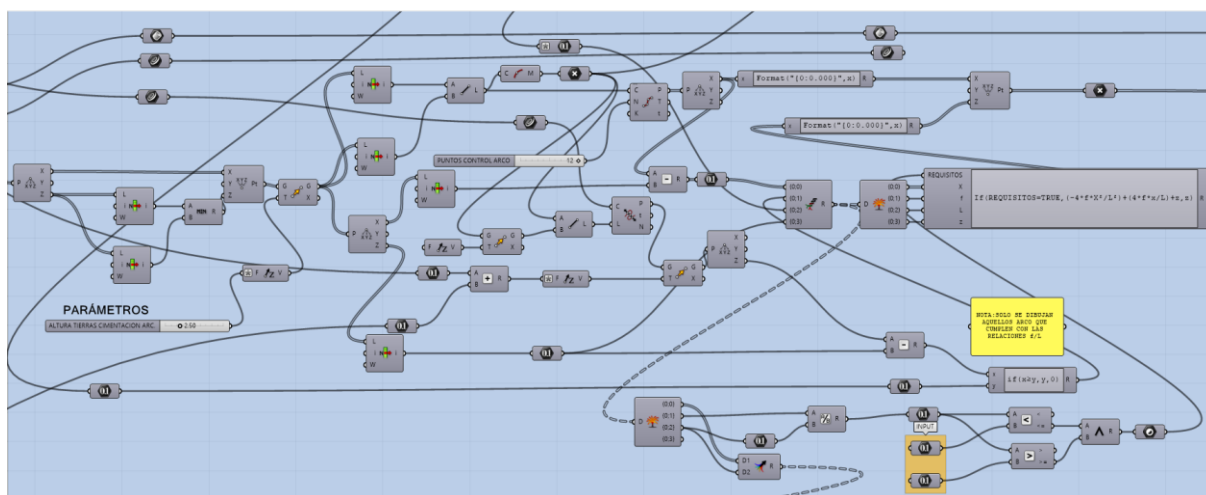


Figura 26. Encaje de la luz y representación de la directriz.

En paralelo al encaje y definición de la directriz de van construyendo las secciones transversales del arco. Los parámetros de estas secciones son sus dimensiones exteriores y los espesores de alas y almas (Figura 27)

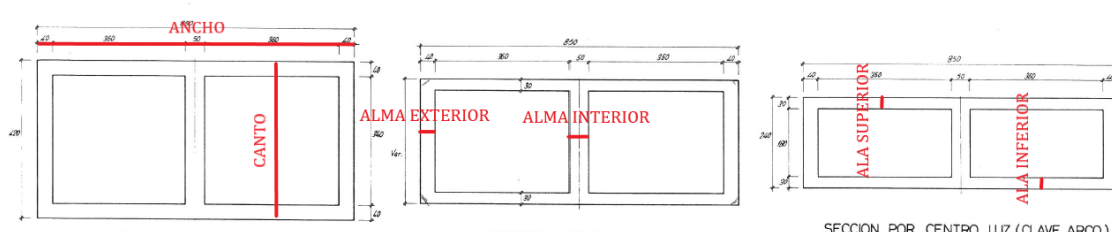


FIGURA 27. PARÁMETROS DE LAS SECCIONES DEL ARCO.

Con el objetivo de simplificar el número de parámetros requeridos y que estos solo dependan de la sección de clave del arco se consideran las siguientes relaciones:

- Ley de cantos: se establece una ley parabólica, Ecuación (3), análoga al trazado de la directriz, para obtener cantos de distintas secciones transversales en función del canto del arranque y la variación entre los cantos en esta sección y en la de clave.

$$h = \frac{4\Delta H}{L^2}x^2 - \frac{4\Delta H}{L}x + H_{max} \quad (3)$$

- Relación entre cantos: esta variable expresa el canto de la sección en el arranque como un múltiplo del canto de la sección en clave (X).

$$h_{\text{arranque}} = X \times h_{\text{clave}} \quad (4)$$

$$1 \leq X \leq 2$$

En base a la simplificación de parámetros realizada, se construyen secciones transversales del arco (Figura 28) para la posición de los puntos anteriormente obtenidos para la directriz.

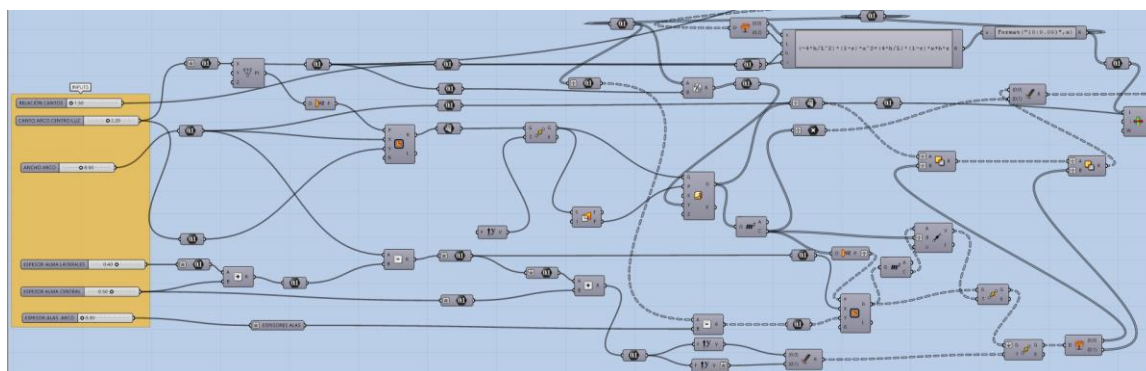


Figura 28. Representación de las secciones trasversales del arco.

Posteriormente las secciones transversales del arco se trasladan y orientan a su posición definitiva, asegurando su perpendicularidad respecto a la directriz. Realizada esta operación, se genera el sólido 3D del arco realizando un solevado, de las secciones transversales (Figura 29). Para mantener el trazado parabólico del sólido resultante, se toman como guías la directriz del arco y la curva que se obtiene, de unir los puntos medios del lado inferior de las secciones.



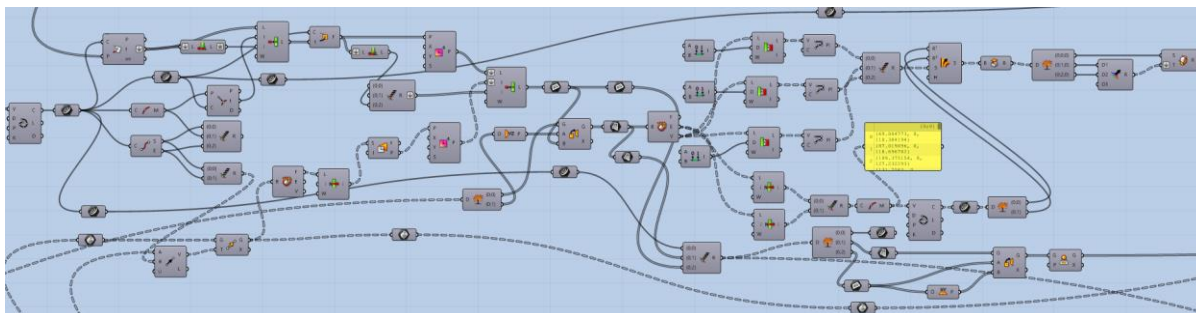


Figura 29. Construcción del sólido 3d del arco.

Por otro lado, y a la vez que se construye el arco, se definen sus cimentaciones. Para definir estos elementos se construye un prisma sobre el que se realizan dos cortes, que representan los planos de cimentación y del arranque del arco. Estos planos se definen en base a chaflanes. Las variables que influyen en esta definición son las siguientes (Figura 30).

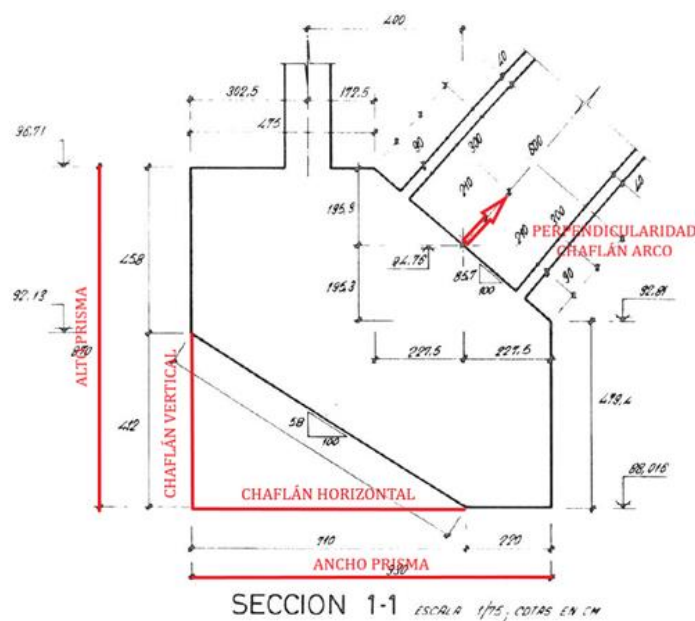


Figura 30. Parámetros de la cimentación del arco.

Mención especial debe realizarse a la condición de perpendicularidad en el arranque del arco, por que condiciona la tangente en el origen del elemento arco.

Otra variable muy importante, no representada con el resto de los parámetros (Figura 31) es la distancia horizontal entre el eje de la pila que nace de la cimentación del arco y del punto de arranque de la directriz. La importancia de esta variable se debe a que este parámetro separa la luz de los vanos del arco y de los vanos exteriores, condicionando los valores de estas dos variables.

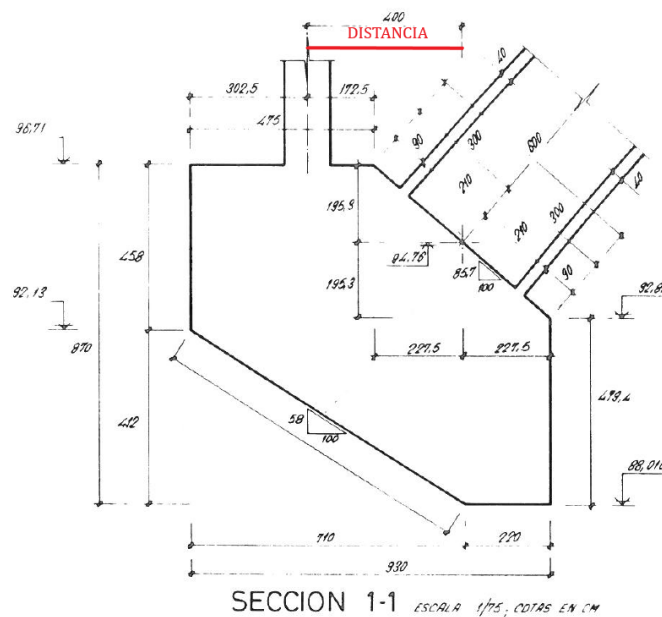


Figura 31. Parámetro distancia pila-arranque.

Definidos los parámetros de la cimentación se modela el prisma exterior y se realizan los chaflanes de los planos inclinados. A continuación, se lleva el arranque a su posición definitiva y se realiza una simetría para materializar el otro elemento

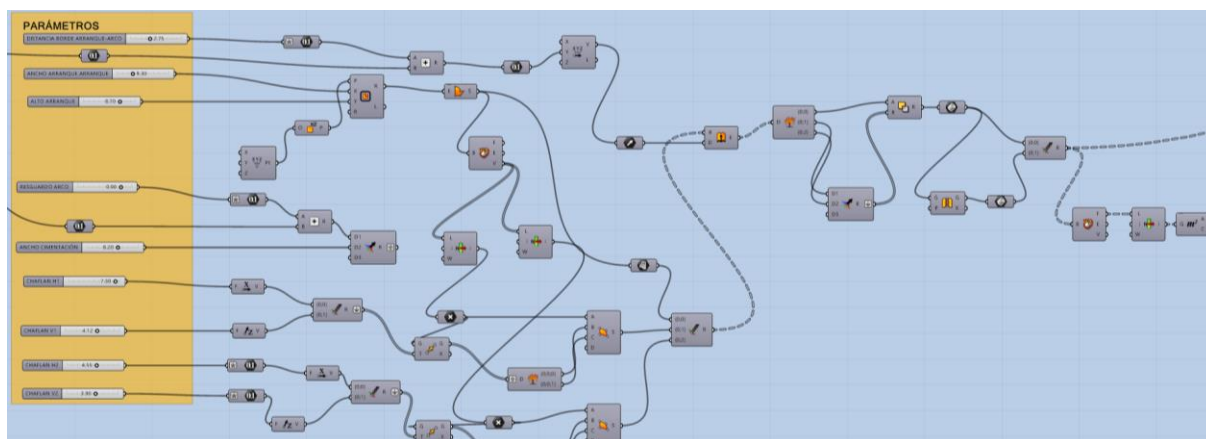


Figura 32. Construcción de los sólidos 3d de las cimentaciones del arco.

#### 4.3.1.2 PILAS

Antes de generarse las pilas deben obtenerse las luces de los vanos, las cuales se fijan en función de la luz del arco,

Ecuación (5). La justificación de este valor responde a criterios de diseño estructural.

$$L_{\text{vano}} = \frac{L_{\text{arco}}}{10} \quad (5)$$

La longitud del puente se mantiene constante pese a que puede variarse, al igual que el resto de los parámetros del trazado. Este hecho obliga a considerar dos luces de vano, una para los vanos de aproximación y otra para los vanos sobre el arco, a fin de garantizar que todos los vanos cumplan el criterio de uniformidad de las luces que se acaba de exponer.

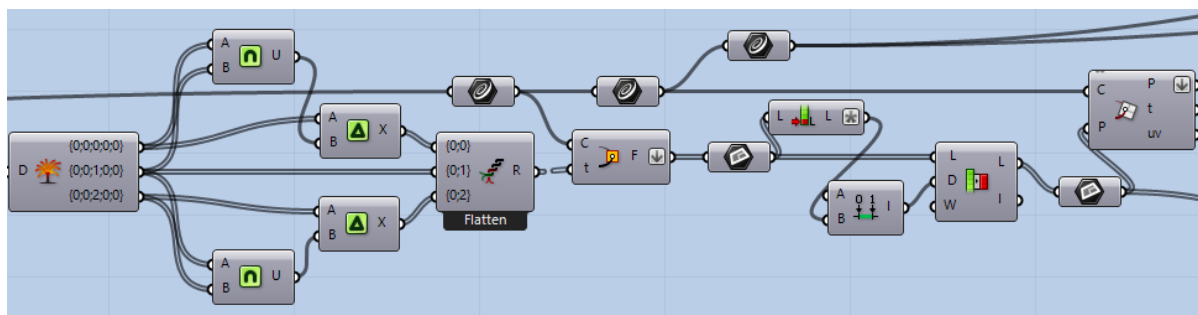


Figura 33. Obtención de luces del vano del arco y vanos de aproximación.

La definición paramétrica de las pila y sus cimentaciones es muy sencilla, pues estos elementos pueden definirse en base a las tres dimensiones de los prismas que los componen (Figura 34).

En primer lugar, se define la altura de las pila, la cual es una variable indirecta, que se obtiene de la intersección de ejes verticales, ubicados en los extremos de los vanos, realizándose su intersección con la cara inferior del tablero y con el terreno. Para realizar esta operación los sólidos del tablero y el terreno deben estar definido de antemano.

A fin de representar la cimentación, en la intersección del terreno debe desplazarse su intersección con el terreno la distancia correspondiente a la altura de las tierras sobre el plano de cimentación ( $D$ ) a fin de obtener la longitud total de las pila. Este parámetro, aunque variable, se fija en 3 m Ecuación (6).

$$2 \leq D \leq 3 \quad (6)$$

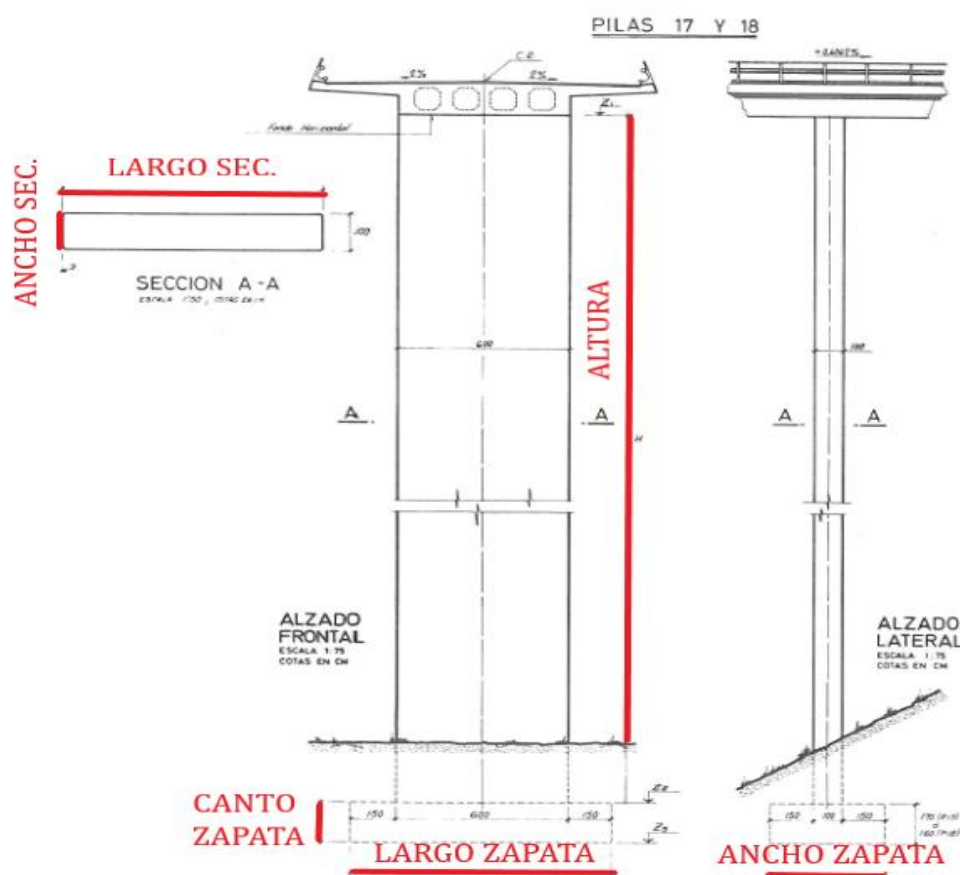


Figura 34. Parámetros para las pilas y sus cimentaciones.

Tras obtener los ejes de las pilas se separan y clasifican estos en función de si son; pilas de los vanos de aproximación, con zapatas propias, pilas de los arranques, con la misma cimentación que el arco, o pilas que nacen del arco. De esta forma se facilita la realización de las intersecciones de las pilas con el arco y el tablero, y la orientación y colocación de las cimentaciones.

Al mismo tiempo que se realiza la operación descrita en el párrafo anterior se procede a definir los parámetros de la sección transversal de las pilas. El valor del canto, variable de unas pilas a otras, se fija en 1 m.

Debe precisarse que, pese a que el ancho de la sección es variable, su valor viene heredado del ancho inferior del tablero, con el fin de que ambas variables coincidan.

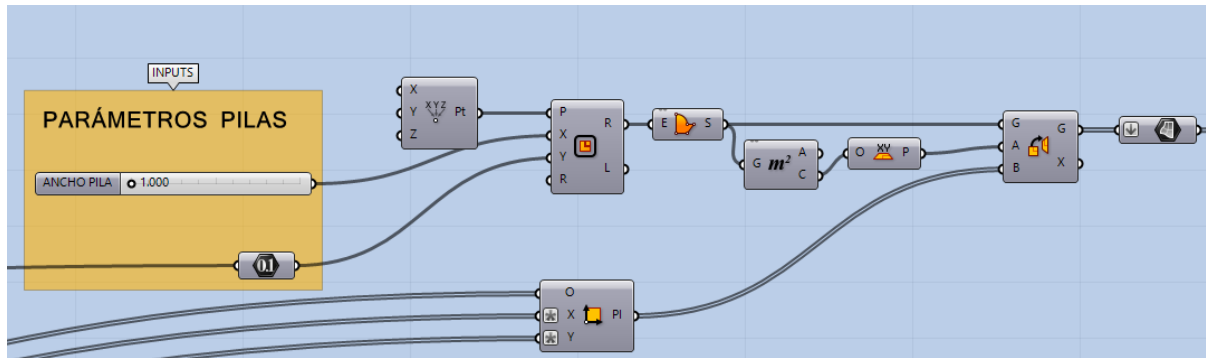


Figura 35. definición de la sección de las pilas.

Una vez definidas las secciones de las pilas, estas se llevan a su posición definitiva y se orientan. Utilizando estos elementos se procede a continuación, a realizar su extrusión, utilizando su eje como trayectoria para materializar su solido 3D

Cuando se tienen los ejes de las pilas y las secciones transversales, las cuales se posicionan y orientan previamente, basta con realizar la extrusión de las citadas secciones, usando como trayectorias los ejes de cada pila para definir los sólidos 3D de estos elementos.

Finalmente, para completar las pilas se realizan las intersecciones de sus solidos con el arco y el tablero, según corresponda, para obtener su representación real.

El proceso completo de la definición de las pilas puede verse en la siguiente figura (Figura 36)

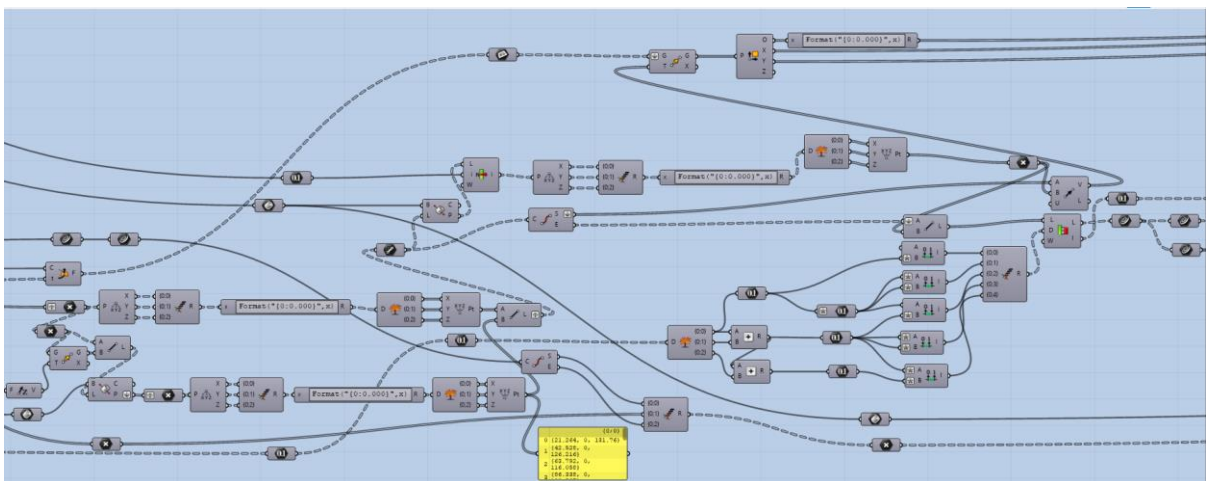


Figura 36. Generación de las pilas.

Acabado el proceso de construcción de las pilas se procede a materializar las cimentaciones mediante un prisma de ancho y canto variables (Figura 37). El ancho es igual a 10 m para todas las cimentaciones, no así su canto, el cual varía entre 1,5 y 2m, aunque se fija en 2 m para simplificar la representación del modelo. Realizada esta operación se copia el elemento y se coloca en su posición definitiva.

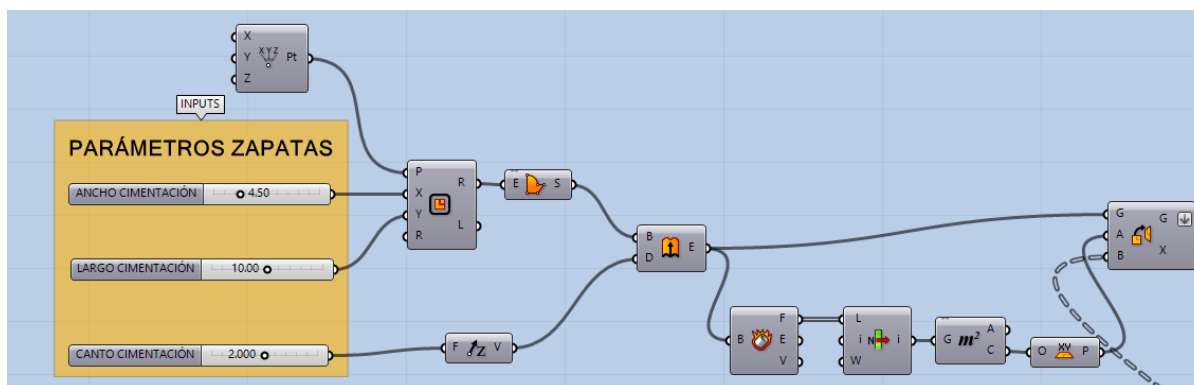


Figura 37. Definición de las cimentaciones de las pilas.

#### 4.3.1.3 TABLERO

El primer paso para la definición del tablero es obtener su eje, compuesto por un único tramo recto. Para definir este elemento se toman como parámetros las coordenadas del punto inicial del puente, su longitud total y la pendiente del tramo recto. A continuación, se parametriza la sección.

Una vez que se define este elemento se representa la sección transversal parametrizando todas las variables que se consideran importantes (Figura 38): anchos superior e inferior, canto, almas, dimensiones de los aligeramientos y dimensiones de la viga de borde, que materializa el voladizo del tablero.

Para la definición de la sección se crean por separado la sección transversal sin aligerar (Figura 39) y los aligeramientos (Figura 40). Los cuales se colocan sobre la sección sin aligerar, mediante una matriz adaptable al número de aligeramientos que pueden disponerse en el ancho del tablero, en función del ancho inferior de este y de las dimensiones de los aligeramientos.



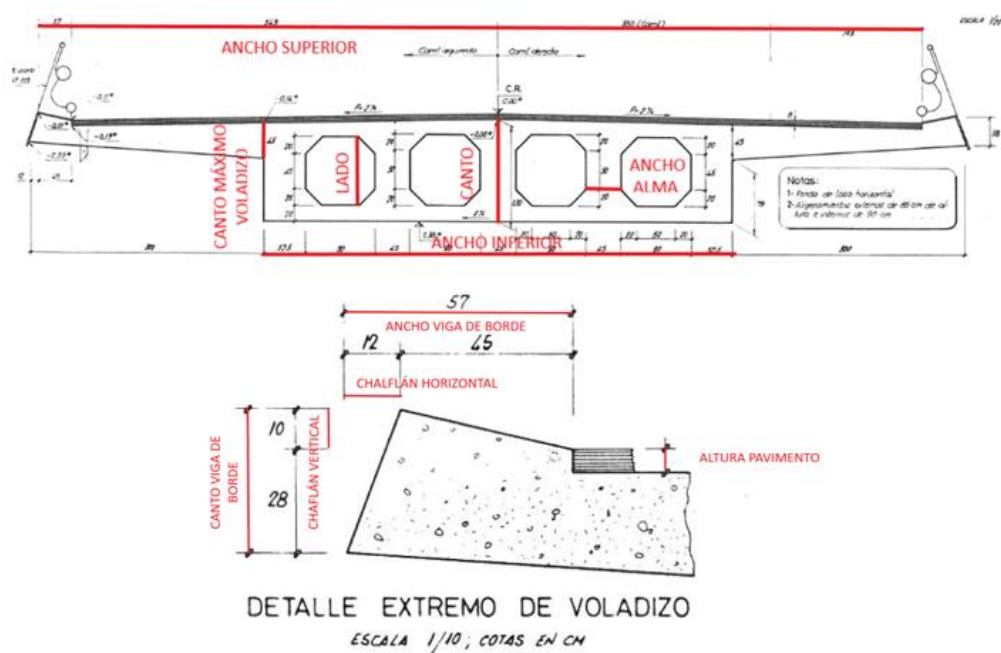


Figura 38. parámetros de la sección del tablero.

Aunque los aligeramientos externos tienen una altura menor que los centrales, con el fin de mantener el ala superior de espesor constante, se considera que todos los aligeramientos son iguales. De esta forma todos estos pueden representarse en base al mismo cuadrado, de lado variable, con chaflanes iguales en sus cuatro esquinas, tanto en vertical como en horizontal.

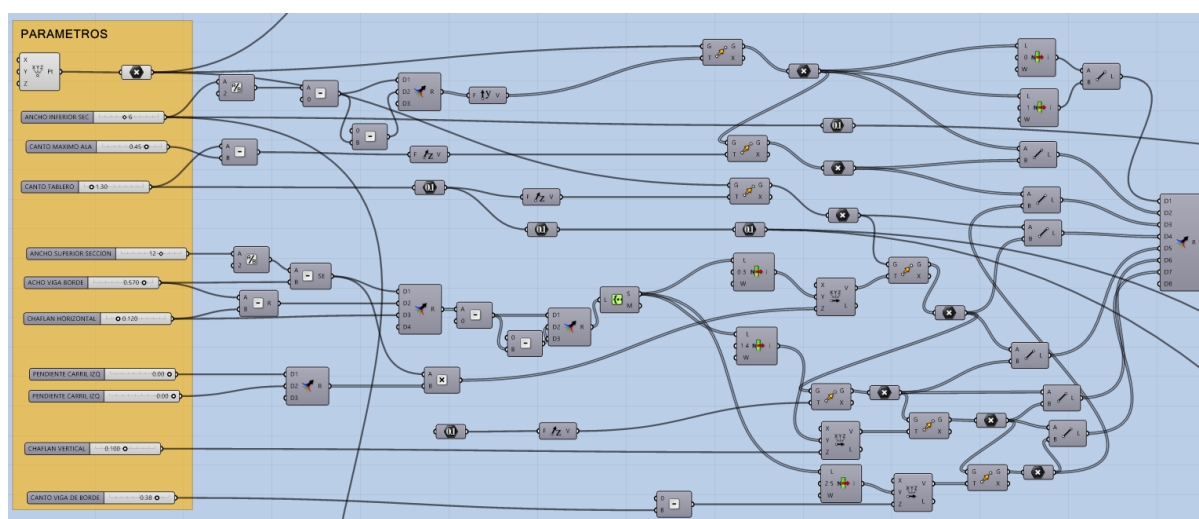


Figura 39. Construcción de la sección sin aligerar del tablero.



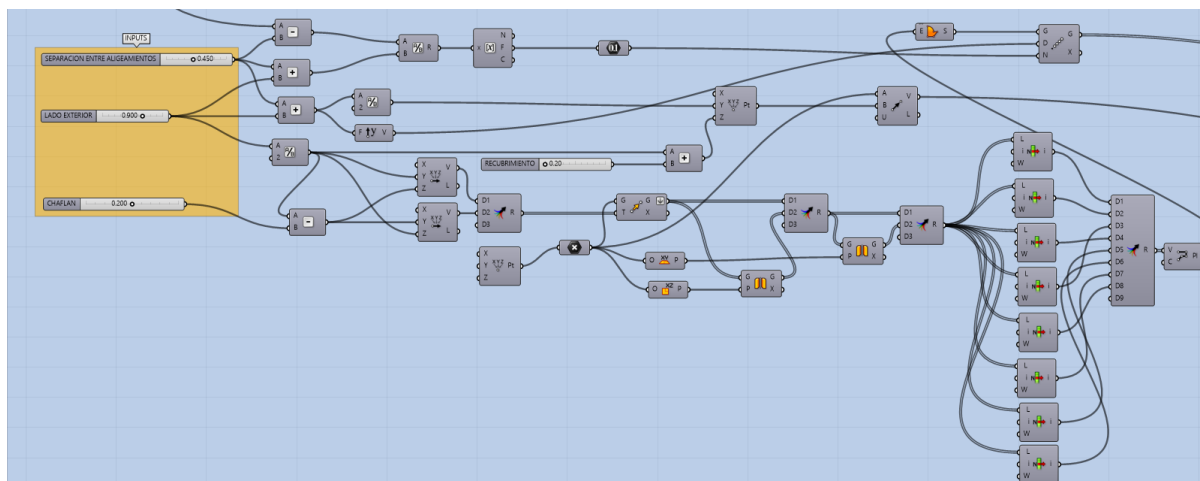


Figura 40. Definición de los aligeramientos del tablero.

A continuación, se sustrae el área de los aligeramientos de la sección del tablero, con el objetivo de definir la sección aligerada. Tras realizar esta operación se extruye esta nueva sección, tomando como directriz el eje del tablero, para crear así el sólido 3D del mismo.

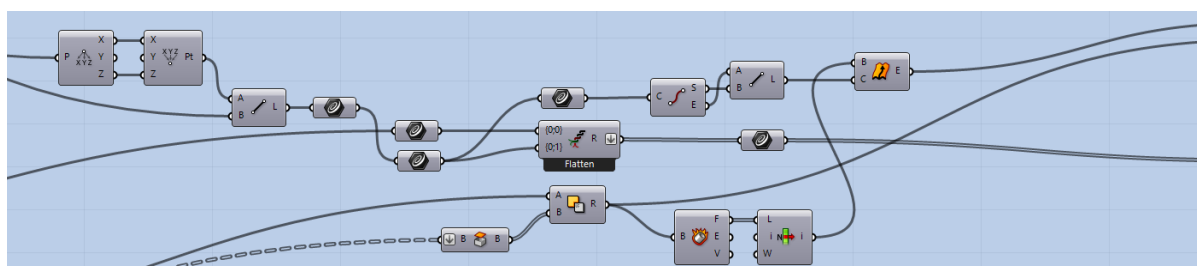


Figura 41. Obtención del sólido 3D del tablero.

### 4.3.2 VOLUMEN CENTRAL DEL ARCO

El volumen central se genera con el fin de obtener las excentricidades límites verticales en determinadas secciones, tal y como se detalla en el apartado 5.2.2.

Desde un punto de vista matemático, el volumen central, es un lugar geométrico, por lo cual puede generarse directamente en Grasshopper, definido por la envolvente de los núcleos centrales.

El núcleo central se define, geoméricamente, como el lugar geométrico de los antipolos de las rectas envolventes de la sección convexa de una determinada sección (Ramos Gimena & Valdenebro García, 1993), por lo cual se desarrolla un procedimiento (Figura 41) que realiza las siguientes funciones:

- Generar la sección convexa de cualquier sección.
- Definir las rectas envolventes, tangentes a la sección convexa.
- Obtener los antipolos.

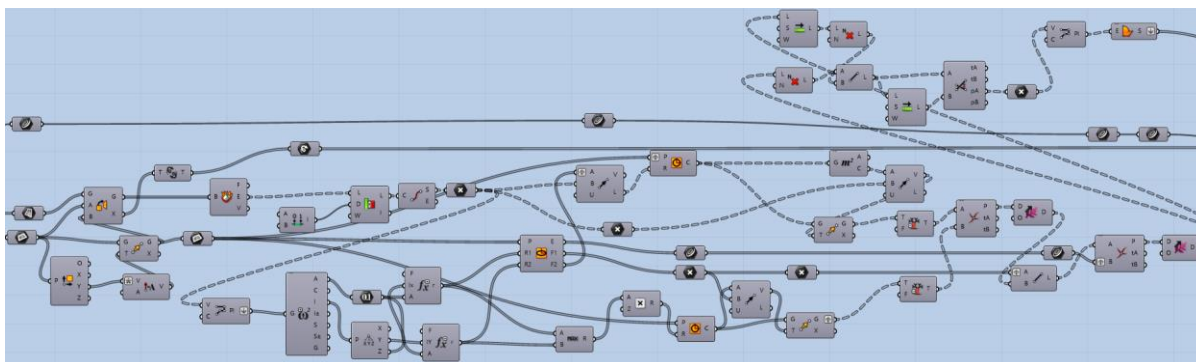


Figura 42. Obtención de los núcleos centrales.

Tras definir los núcleos centrales representativos se realiza el soleado de estos elementos, tomando como eje la directriz del arco y como guía los puntos extremos inferiores del núcleo central (Figura 43). Además, se mide la distancia entre los centros de gravedad de las secciones y lo extremos superiores de los núcleos centrales, para representar los valores de las excentricidades límites del núcleo central.

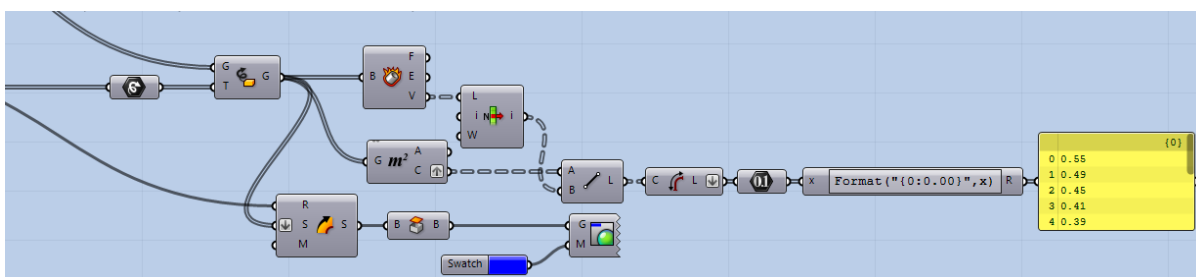


Figura 43. Definición del volumen central y exportación excentricidades.

### 4.3.3 EXPORTACIÓN.

Antes de construir el modelo en Karamba3D y de realizar la exportación, deben realizarse una serie de operaciones previas con el objetivo de definir y ordenar sus elementos conforme a las características del modelo estructural descritas en el apartado 5.3.1 . Entre estas operaciones puede citarse: la

obtención de nodos y barras y la obtención de secciones transversales.

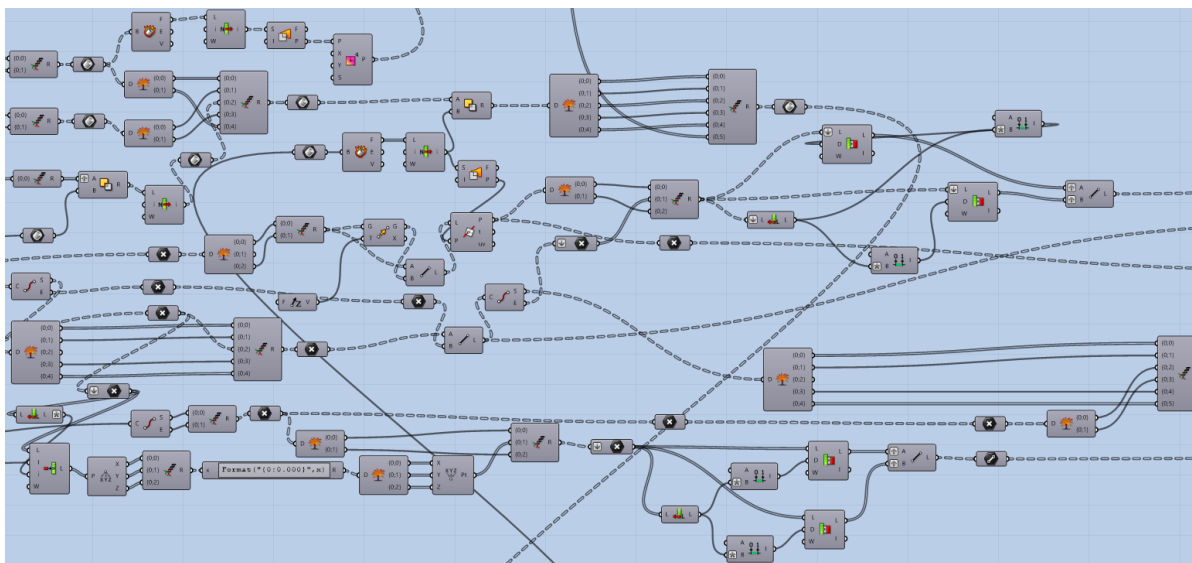


Figura 44. Operaciones previas a la creación del modelo estructural con Karamba3d.

Finalmente, tras realizar el conjunto de operaciones previas descritas en el párrafo anterior, se genera el modelo en Karamba3D (Figura 45). A continuación, se conecta este modelo con el plugin para exportar, en formato IFC, al programa del cálculo estructural.

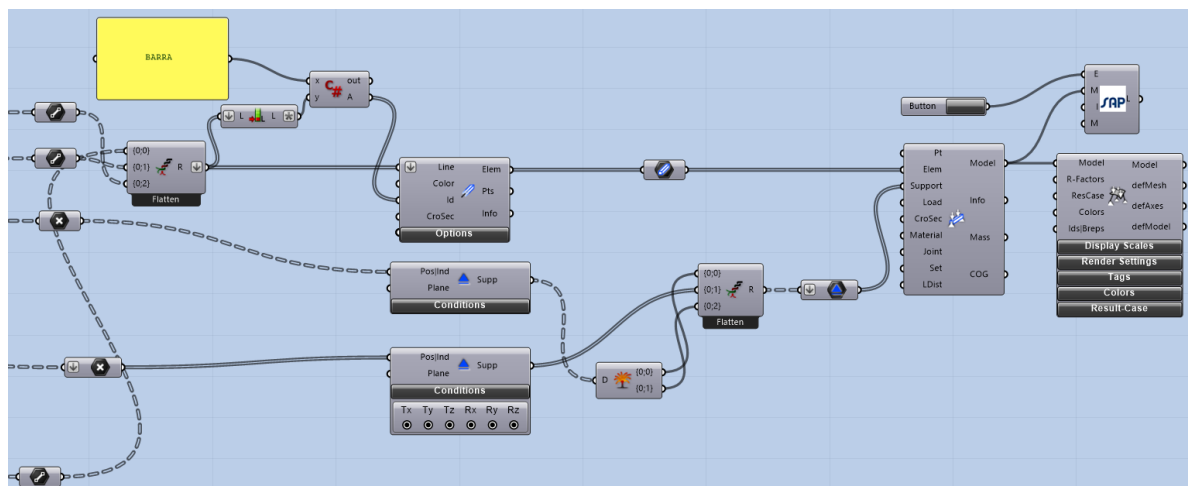


Figura 45. Modelo en Karamba3d y exportación al programa de cálculo estructural.

Debe precisarse que no toda la información puede incluirse en el modelo de Karamba3D. La información no incluida, es la relativa a:

- Las secciones: estos elementos se deben presentar directamente en el programa del cálculo estructural, debido a que la versión empleada de Karamaba3D solo admite secciones transversales, definidas de sus propias

librerías. Para obtener estos elementos en el programa de cálculo estructural, se exportan primero a AutoCAD, para ser introducidas en el programa de cálculo estructural en formato dxf.

- Las cargas: y sus combinaciones se definen directamente en el programa de cálculo estructural, debido a que Karamba3D no realiza adecuadamente su combinación.

En la siguiente figura, Figura 46, se muestra, esquemáticamente, a modo de resumen una imagen global la programación desarrollada con Grasshopper.

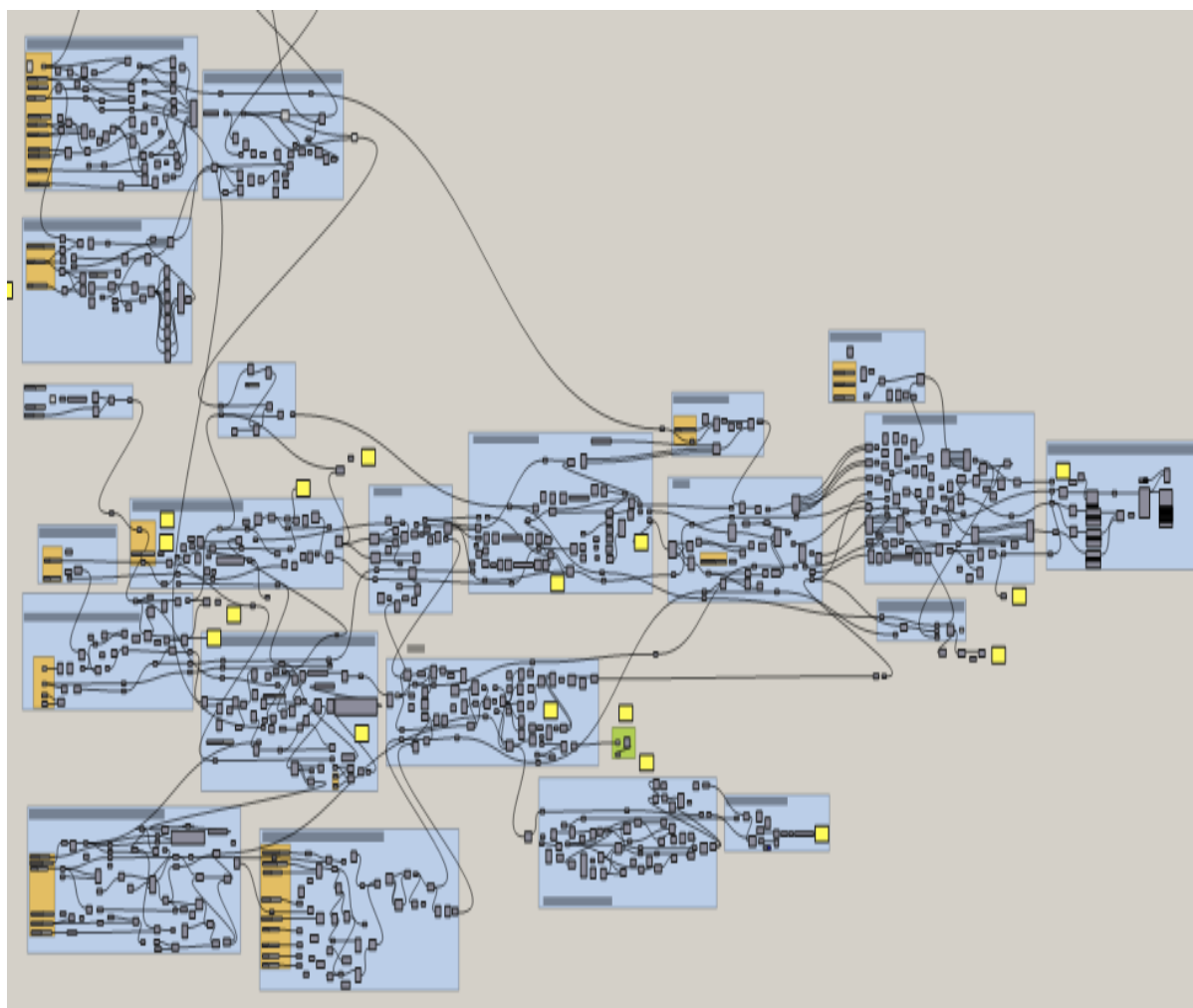


Figura 46. Vista global de la programación del modelo paramétrico.

#### 4.4 VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS.

En las siguientes imágenes (Figura 47 y Figura 48) pueden verse los resultados del modelo paramétrico para la geometría inicial.

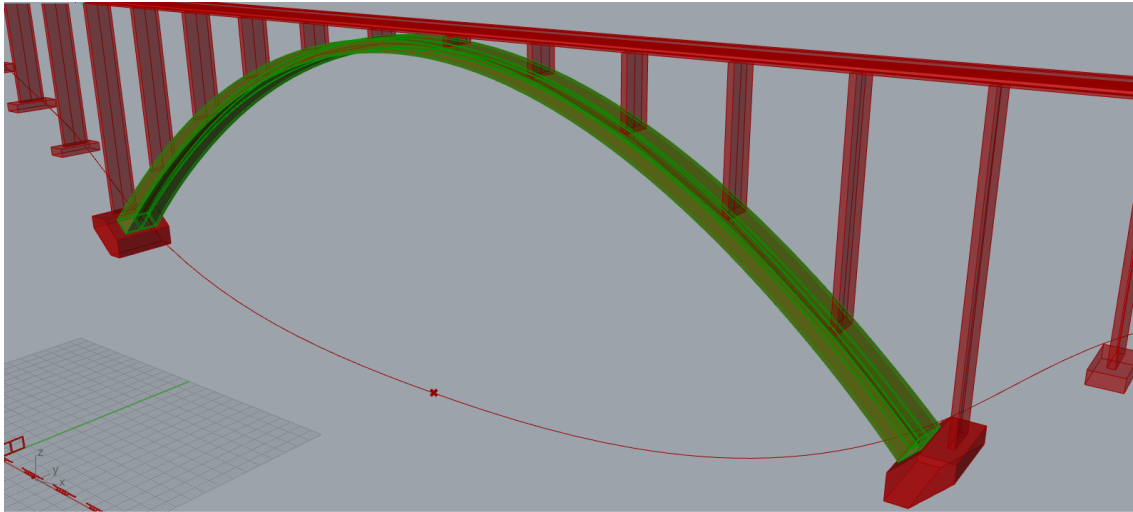


Figura 47. Perspectiva del modelo paramétrico. Detalle del arco.

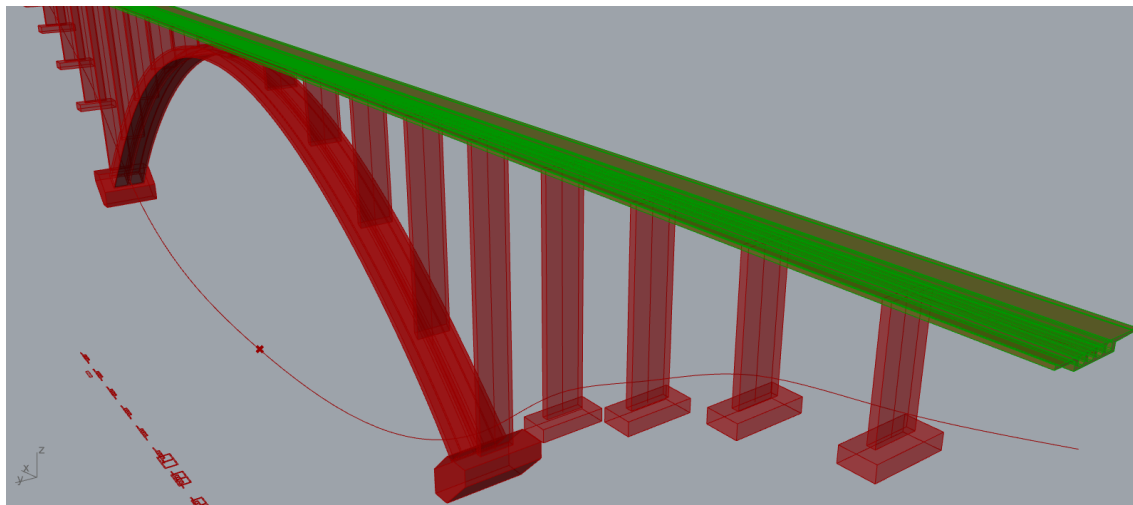


Figura 48. Perspectiva del modelo paramétrico. Detalle del tablero

Adicionalmente en la siguiente imagen (Figura 49) se muestran el resultado del modelo paramétrico y el resultado del modelo estructural vinculado al modelo paramétrico.

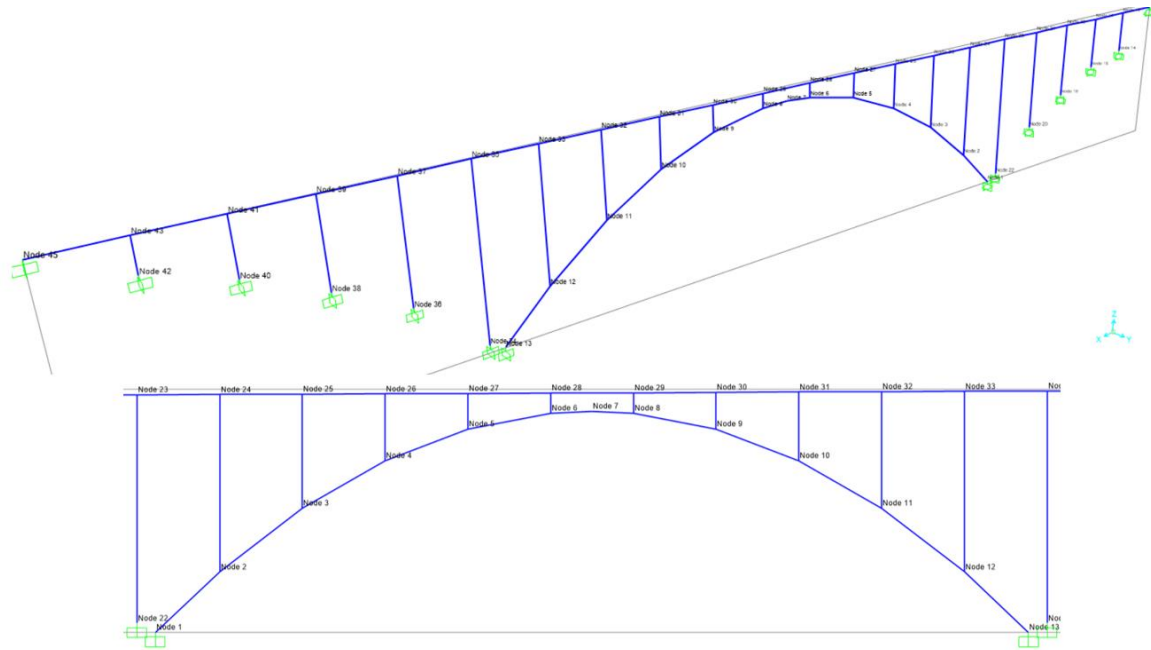


Figura 49. Perspectiva general y detalle del arco del modelo estructural.



## 5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

### 5.1 INTRODUCCIÓN

El modelo paramétrico descrito y generado en el capítulo anterior, 4 , se realiza para proceder a la optimización teórica del elemento arco en base al análisis estructural que se detalla a continuación y que se divide en los siguientes subcapítulos:

- BASES DE LA OPTIMIZACIÓN: se explica la finalidad del análisis estructural, el criterio seguido para el mismo y las fases que lo componen.
- CARACTERÍSTICAS DEL MODELO: se justifica el tipo de modelo que se emplea y se detallan sus principales propiedades
- PROCESO DE OPTIMIZACIÓN: se realizan los cálculos del análisis estructural. En este subapartado se detallan el tipo de análisis, las acciones consideradas y que parámetros del arco se modifican.

### 5.2 BASES DE LA OPTIMIZACIÓN

#### 5.2.1 OBJETIVOS

La optimización teórica del elemento arco, busca reducir los momentos flectores, a través de la optimización de la geometría del puente, producidos por las cargas verticales consideradas, con el fin de:

- Eliminar completamente las zonas traccionadas, fisuradas, en las situaciones de ELS, para mejorar la durabilidad del arco de hormigón, garantizando un mantenimiento mínimo, porque el hecho que existan fisuras en estos casos supone una pérdida de rigidez que debe ser cubierta aportando más material.
- Reducir las tracciones que se generaran en ELU, con el fin de minimizar las cuantías de armadura necesaria para resistir las tracciones que pueden producirse en estas situaciones.

### 5.2.2 CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN

Se ha considerado que, para una optimización adecuada, es suficiente con garantizar que no existan tracciones en las situaciones de ELS. Este criterio implica que los momentos flectores pésimos de las cargas consideradas, en cada sección, deben ser menores que el flector correspondiente que se produce al aplicar un axil, en los bordes del núcleo central, es decir que la excentricidad de la carga este dentro del núcleo central, Ecuación (7).

$$M \leq M_{\text{núcleo central}} \quad (7)$$

El criterio de ausencia de tracciones puede expresarse también, en función de los siguientes conceptos:

- Volumen central: es la envolvente de los núcleos centrales de las distintas secciones de un elemento. Este concepto es la extrapolación tridimensional de núcleo central, el cual se define como los puntos de una sección, en los que, si se aplica una carga, solo se producen tensiones de compresión.
- Directriz: es el lugar geométrico definido por los centros de gravedad de todas las secciones, que constituyen un elemento.
- Línea de presiones: es el lugar geométrico de la envolvente de los todos los puntos de aplicación de las cargas axiales, en todas las secciones de un elemento respecto a su directriz. A nivel de sección, representa la distancia o excentricidad, de una carga respecto al centro de gravedad.

De este modo, el criterio de inexistencia de tracciones se enuncia como la búsqueda de la línea de presiones, que queda completamente comprendida dentro del volumen central del arco. A nivel de sección, como se ha comentado, este criterio se expresa limitando la excentricidad máxima de las cargas, a la excentricidad límite del núcleo central, Ecuación (8).

$$e \leq e_{\text{núcleo central}} \quad (8)$$

## 5.3 INFORMACIÓN

### 5.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

Para realizar el análisis estructural, basta con realizar un modelo de barras, ya que este, es un tipo de elemento, pero con precisión suficiente para el estudio que nos ocupa y rápido para obtener los esfuerzos, flectores y axiles, necesarios para el análisis propuesto. Las principales características de este modelo son:

- Arco: se toman como nodos los puntos representativos correspondientes a los arranques, sección en clave y pasos por pila.
- Tablero: se modeliza también mediante barras, que representan los vanos como vigas. Se decide que no es necesario realizar otros modelos más complejos, como un emparrillado plano, pues no se requiere analizar en detalle este elemento.
- Apoyos: se desprecia la influencia de la rigidez de los aparatos de apoyos. Los arranques de las pilas al terreno se materializan mediante empotramientos, mientras que los extremos son apoyos de reacción vertical.

### 5.3.2 ACCIONES CONSIDERADAS

Para simplificar el proceso de optimización del elemento arco, no se han considerado todas las cargas que actúan sobre él. Las acciones consideradas presentan las siguientes características:

- Verticales: solo se consideran este tipo de cargas, con el fin de simplificar la optimización del arco. En el caso de que se consideren cargas horizontales, como las fuerzas de frenado/ aceleración o viento, el proceso es completamente análogo al descrito, aunque más tedioso.
- Estáticas: no se consideran ningún tipo de carga dinámica, como, por ejemplo, el sismo. Las sobrecargas, aunque varían de posición, tienen un efecto despreciable por tratarse de un puente carretero.

Las cargas que se van a emplear para la optimización son:

- Peso propio (PP): se introduce automáticamente en el programa de cálculo. Basta con considerar el peso específico del hormigón armado en 25 kN/m<sup>3</sup>.
- Cargas permanentes (CP): solo se consideran las cargas correspondientes al firme bituminoso de 8 cm, extendido en todo el ancho de 10,86 m del tablero (carriles y arcenes) aumentado en un 50% para tener en consideración las irregularidades que puedan existir, Ecuación (9).

$$\begin{aligned}
 CP_{\text{pavimento}} &= 0,08 \text{ (m)} \times 10,86 \text{ (m)} \times 23 \left( \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) \times 1,5 \\
 &= 29,973 \frac{\text{kN}}{\text{m}}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

- Sobrecargas: debe tenerse en cuenta, que solo existe un carril virtual por sentido de circulación, pues existe actualmente una barrera de hormigón. Las sobrecargas consideradas son: del tráfico (Tabla 2) y del vehículo pesado (Tabla 3). Estas actúan sobre las directrices de las barras del tablero, ya que no se pretenden obtener los esfuerzos de torsión, ni analizar los efectos del reparto transversal.

SOBRECARGA REPARTIDA (SR)	w (m)	q <sub>ik</sub> (KN/m <sup>2</sup> )	q <sub>ik</sub> (KN/m)
CV1	3.5	9	31.5
AREA REMANENTE	1.93	2.5	4.825
TOTAL			36.325

Tabla 2. Sobrecarga tráfico.

SOBRECARGA PUNTUAL (SP)	w (m)	Q <sub>ik</sub> (KN)	2Q <sub>ik</sub> (KN)
CV1	3.5	300	600
AREA REMANENTE	1.93	0	0
TOTAL			600

Tabla 3. Sobrecarga vehículo pesado.

Como se ha visto con anterioridad las cargas deben combinarse en ELS, para la combinación poco probable o característica, por ser esta la que origina los mayores esfuerzos de flexión pésimos de entre todas las combinaciones. Debe tenerse en cuenta, de cara a la combinación de acciones, que la sobrecarga dominante es la acción puntual del vehículo pesado, pues las luces de los vanos del tablero son bajas, entre 17 y 25 m, para los distintos modelos analizados.

Existen dos tipos de combinaciones:

- PERMANENTE: tiene en cuenta las acciones correspondientes al peso propio y el peso muerto del firme. Se usan para ajustar la directriz del puente, pues como se mencionó en el apartado 3.2.2.1 estas son las cargas para las cuales se fijó la directriz original.
- ENVOLVENTE: además de las acciones correspondientes al peso propio y del firme, se deben considerar los esfuerzos de las envolventes de las sobrecargas. Esta combinación se realiza para conocer los esfuerzos pésimos sobre el arco. A priori, pueden darse dos situaciones:
  - ENVOLVENTE-1: se corresponde a la situación en la que solo existe tráfico rodado en un sentido de circulación.
  - ENVOLVENTE-2: existe tráfico en ambos sentidos de circulación.

Finalmente debe mencionarse que, el análisis que se propone es de tipo lineal, pues no se tiene en cuenta los efectos de no linealidad geométrica ni del material.

## 5.4 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

### 5.4.1 JUSTIFICACIÓN

El modelo de Karamba 3D se exporta a SAP2000, por lo que es imposible realizar un ajuste automático, de los parámetros del arco con el primer programa.

### 5.4.2 DIRECTRIZ

En primer lugar, se procede a ajustar la directriz, pues en los elementos tipo arco, los esfuerzos dependen principalmente de su configuración geométrica (Manterola, 2006).

#### 5.4.2.1 CRITERIOS Y CASOS CONSIDERADOS

Con el fin de proceder al ajuste de luz del arco debe analizar la relación flecha-luz de la directriz original, Ecuación (10).

$$\frac{f}{L} = \frac{48 \text{ (m)}}{190 \text{ (m)}} \sim \frac{1}{4} \quad (10)$$

Como puede observarse, este valor está muy próximo al valor límite superior del rango habitual de relaciones flecha-luz, Ecuación (10).

Con el fin de reducir la relación flecha-luz se propone aumentar la luz manteniendo la flecha máxima admisible, resultante de este aumento. Este hecho es posible porque debido a la forma del terreno en V, al aumentar la luz, disminuye el valor de la flecha máxima admisible, siempre y cuando no se modifiquen ni el tablero ni el trazado, como es el caso, conforme a lo expresado en el apartado 4.3.1.1.

Con el objetivo de tantear que directrices deben ser analizadas se decide examinar como varía el volumen total del puente bajo las siguientes condiciones:

- Aumentos de la luz cada 10 m, desde los 190 m hasta 270 m, realizándose un aumento, total de un 40 % respecto a la luz inicial.
- Flecha máxima admisible, en función de la distancia al tablero y los criterios de relaciones flecha luz, Ecuación (11), para las luces consideradas.
- Secciones transversales, sin modificar, correspondientes a las situaciones de partida de todos los elementos, arco, pilas, tablero.
- Empujes máximos al terreno que no superen el 70 % de los iniciales.



En base a los resultados mostrados en la siguiente figura (Figura 50), se observa que a medida que aumenta la luz, se reduce el número y longitud de las pilas. Además, cuando se reduce el número de las pilas exteriores al arco se eliminan sus respectivas cimentaciones, produciéndose claras reducciones del volumen del puente.

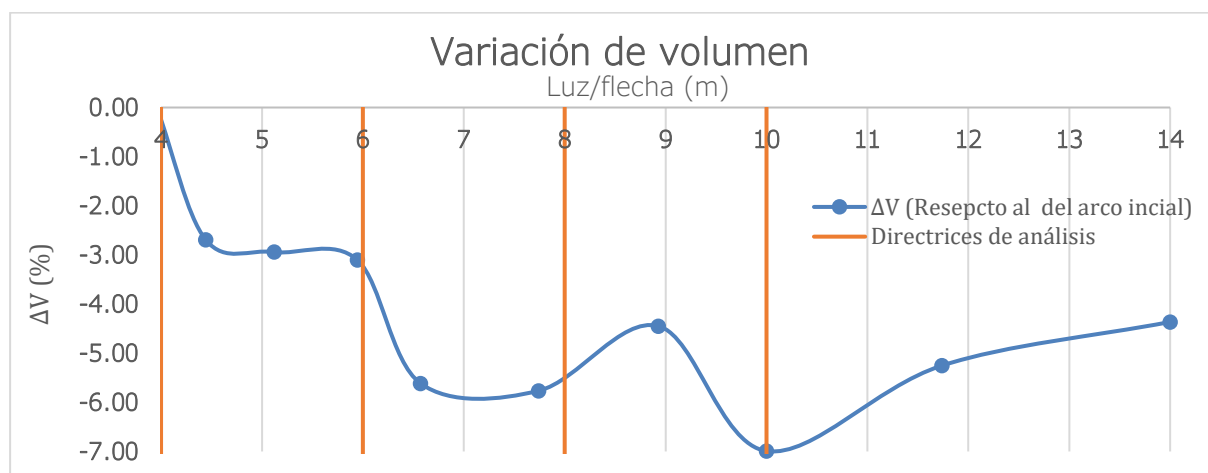


Figura 50. Variación del volumen respecto al inicial.

En base a la gráfica precedente se toman como punto de partida para el ajuste de la directriz, situaciones que se corresponden con relaciones luz-flecha, o flecha-luz, que se encuentran cerca de los mínimos relativos analizados. Estos casos se muestran en Figura 50 y se recopilan en la Tabla 4.

CASO	Luz(m)	Flecha (m)	Flecha-luz (f/L)
DIRECTRIZ-1	190	48	1/4
DIRECTRIZ-2	220	36	1/6
DIRECTRIZ-3	240	30	1/8
DIRECTRIZ-4	260	26	1/10

Tabla 4. Directrices consideradas.

Estas directrices son analizadas empleando solo la combinación PERMANENTE, definida en el apartado 5.3.2, porque, para este primer ajuste, solamente interesa analizar el arco bajo las acciones correspondientes al peso propio y a las cargas muertas. De esta forma se logra minimizar las desviaciones de la línea de presiones cuando se consideren las sobrecargas.

### 5.4.2.2 RESULTADOS

Los resultados de los esfuerzos para el tanteo de las directrices consideradas se muestran las Figura 51 y Figura 52. En ambos casos los casos analizados se nombran en función de su relación flecha-luz.

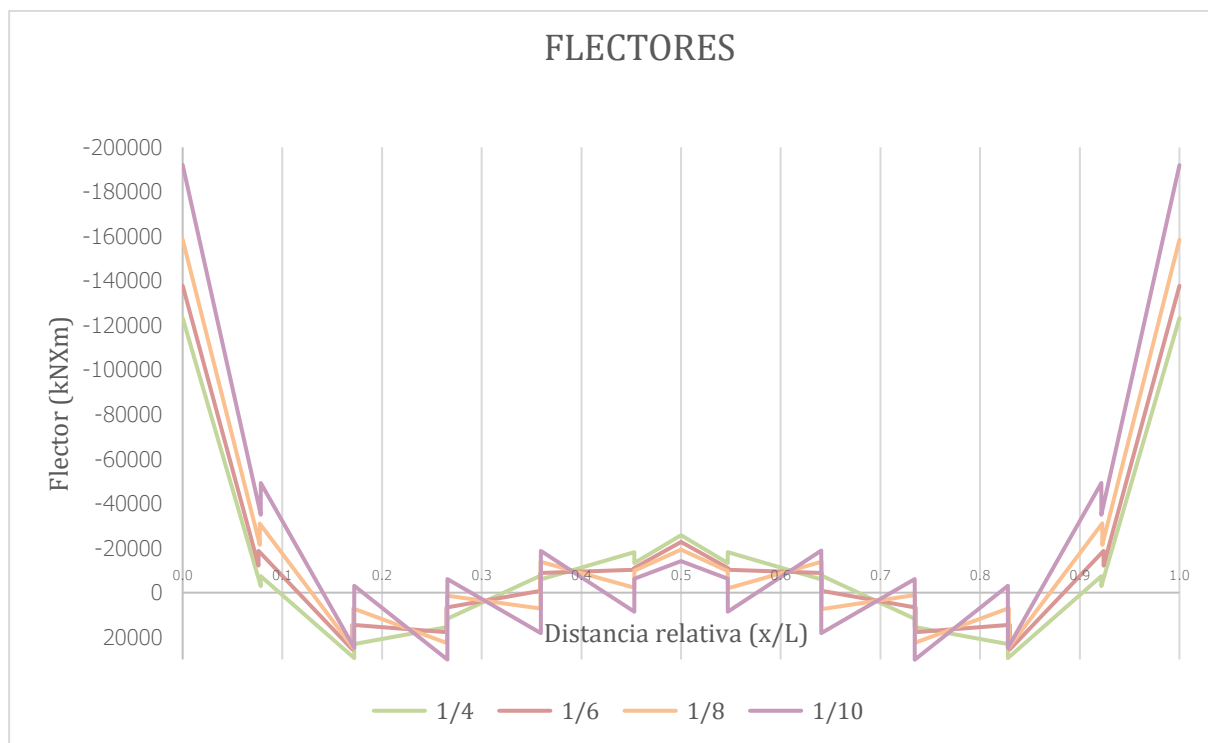


Figura 51. Flectores para el ajuste de la directriz.

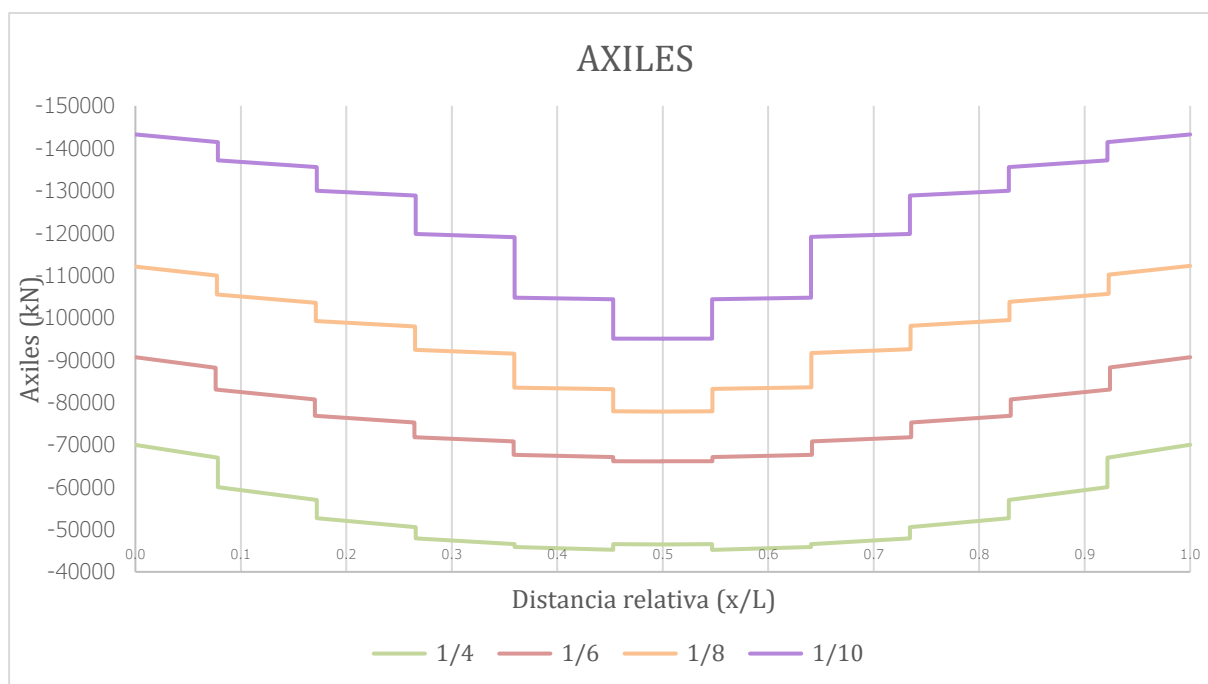


Figura 52. Axiles para el ajuste de la directriz.

Las principales conclusiones que se obtienen de este análisis son:

- Existe un rango de luces, Ecuación (11), para el cual se produce una notable reducción del flector, sin sobrepasar el valor límite del incremento de los empujes al terreno del 70% ya que para estas luces este incremento es del 30 al 60%

$$220 \leq L(m) \leq 240 \quad (11)$$

- La sección del centro luz, o clave, no es crítica, debido a que se producen incrementos del axil con una clara reducción del flector, por lo cual su excentricidad disminuye para todas las directrices analizadas. Este hecho es clave para el análisis de la optimización de la sección del arco.
- Las secciones de las zonas central del arco, pese a que su flector aumenta, tampoco son críticas, pues lo hace en menor proporción que su axil, de modo que estos tramos quedan más próximos al núcleo central, pues se reducen sus excentricidades.
- Las secciones en los arranques se comportan de forma similar a las zonas intermedias, con la salvedad de que no se logra que estas, estén comprimidas debido a los importantes esfuerzos flectores que se producen en estas secciones.
- Se observa que a medida que se aumenta la luz, manteniendo las secciones transversales, existe una mayor variación del axil entre la clave y los arranques.

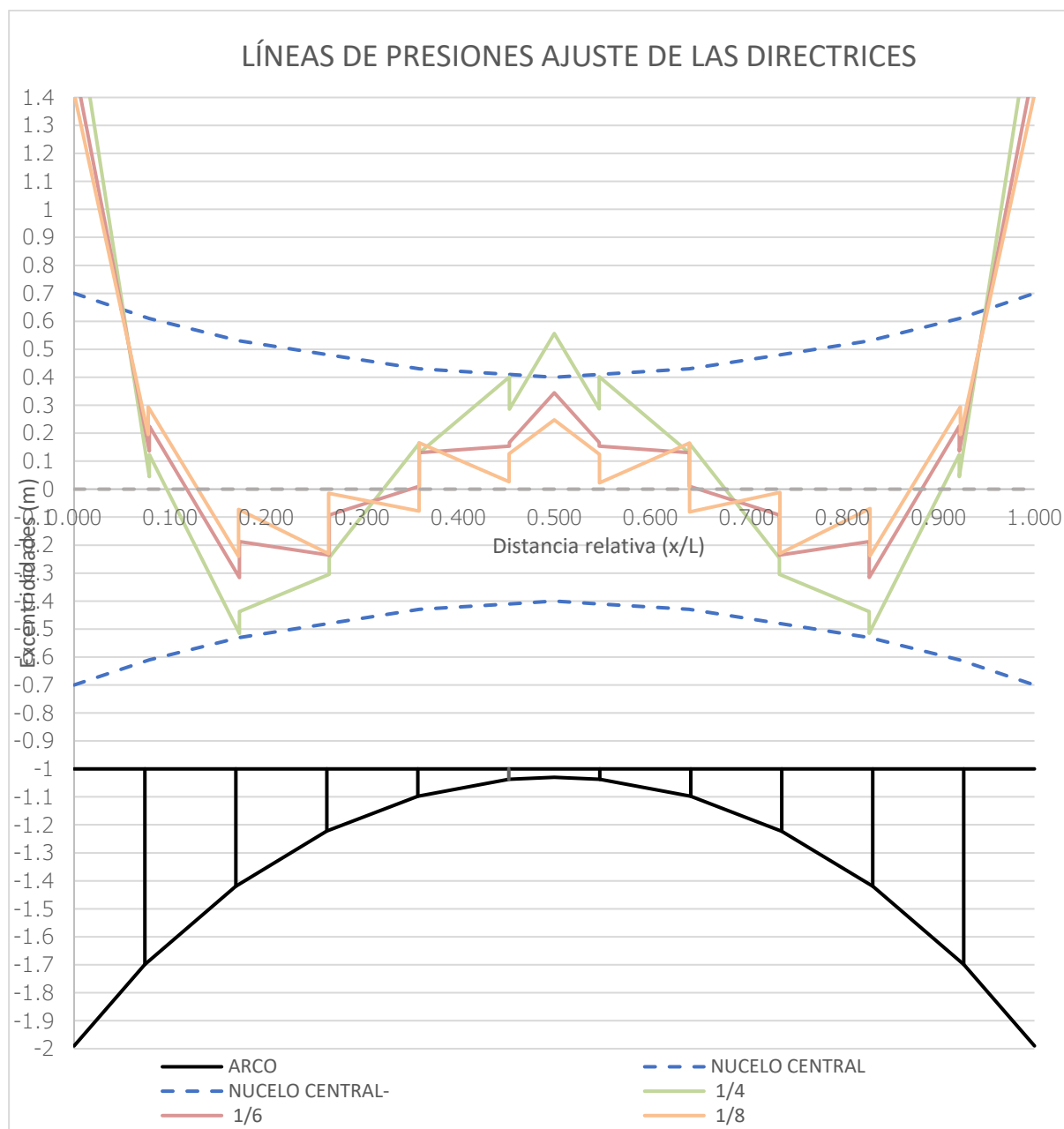


Figura 53. Líneas de presiones para los ajustes de las directrices.

En base a las conclusiones que se extraen del análisis de las distintas directrices consideradas, se procede a representar en la Figura 53 las líneas de presiones para las distintas directrices consideradas, desechándose el caso DIRECTRIZ-4, correspondiente a una relación flecha-luz de 1/10, pues se sobrepasa el valor límite de sus empujes sobre el terreno (>70% de incremento respecto a la situación inicial).

Los principales resultados que se observan del análisis de las excentricidades son:

- DIRECTRIZ-1: para la situación inicial se observa que la línea de presiones está fuera del núcleo central tanto en las secciones a  $L/5$  del arco como en las secciones cercanas a la clave, motivo por el cual se descarta como una solución válida.
- DIRECTRIZ-2: la clave está prácticamente comprimida y se garantiza que la línea de presiones se encuentra más centrada, respecto a la directriz inicial, en las secciones que anteriormente estaban traccionadas, salvo en los arranques.
- DIRECTRIZ 3: el comportamiento es similar al del caso anterior, y aunque se logran reducir aún más las excentricidades en los arranques aún existen tracciones en estas secciones.

Aunque cualquier luz dentro del rango definido con anterioridad en principio es válida, se ha optado por tomar la DIRECTRIZ-3, luz de 240 m y flecha de 31m, por las siguientes razones:

- Esta es la directriz que queda más del lado de la seguridad, pues deja más centrada la línea de presiones, particularmente en las secciones de los arranques, para las cuales se reduce su excentricidad aproximadamente 20 cm.
- De todas las soluciones analizadas es la que mayor incremento de los axiles produce, dentro del rango considerado, lo cual ayuda a minimizar las excentricidades. Este incremento de un 68% respecto a los valores iniciales del axil.
- Se cumple estrictamente con el criterio geotécnico impuesto, pues los empujes al terreno son inferiores del 70 %, concretamente un 68 %. Este incremento de los empujes se considera que puede ser perfectamente resistido por el terreno a falta de un análisis geotécnico más detallado.

### 5.4.3 SECCIÓN TRANSVERSAL. CANTOS EN LOS ARRANQUES

El hecho de ajustar las dimensiones de las secciones transversales del arco se debe a que la rigidez a flexión es el segundo mayor condicionante de los esfuerzos del arco, por detrás de la directriz (Capellán Miguel, Merino Rasillo, & Guil Celada, 2020).

Con el fin de modificar la rigidez a flexión debe recordarse, que todas las acciones consideradas son verticales, por tanto, deben modificarse primero los cantos y luego los anchos, pues la influencia de la primera variable es muy superior a la segunda.

En este caso, al igual que para la directriz también se emplean la combinación de cargas PERMANENTE definida en el apartado 5.3.2.

#### 5.4.3.1 CASOS

En primer lugar, se procede a ajustar los cantos de las secciones de los extremos o arranques. El hecho de empezar por estas secciones se debe a que estas, son las únicas que se encuentran traccionadas.

Las variaciones del canto establecidas introducen reducciones del canto cada 0,45 m, aproximadamente un 10% respecto al valor inicial (Tabla 5) de 4,20 ( $H/L=1/57$ ). De esta forma puede analizarse la sensibilidad de esta variable.

CASO	H(m)	h(m)	H/L
CANTO-1	4,20	2,40	1/57
CANTO-2	3,75	2,40	1/64
CANTO-3	3,30	2,40	1/73
CANTO-4	2,85	2,40	1/84
CANTO-5	2,40	2,40	1/100

Tabla 5. Casos de ajuste de la sección. Canto en los arranques.



### 5.4.3.2 RESULTADOS

En las siguientes figuras, Figura 54 y Figura 55 se representan, solo por comodidad para la exposición de este trabajo, los valores iniciales ( $H/L=1/57$ ), intermedios ( $H/L=1/73$ ) y finales ( $H/L=1/100$ ) de axiles y flectores respectivamente,

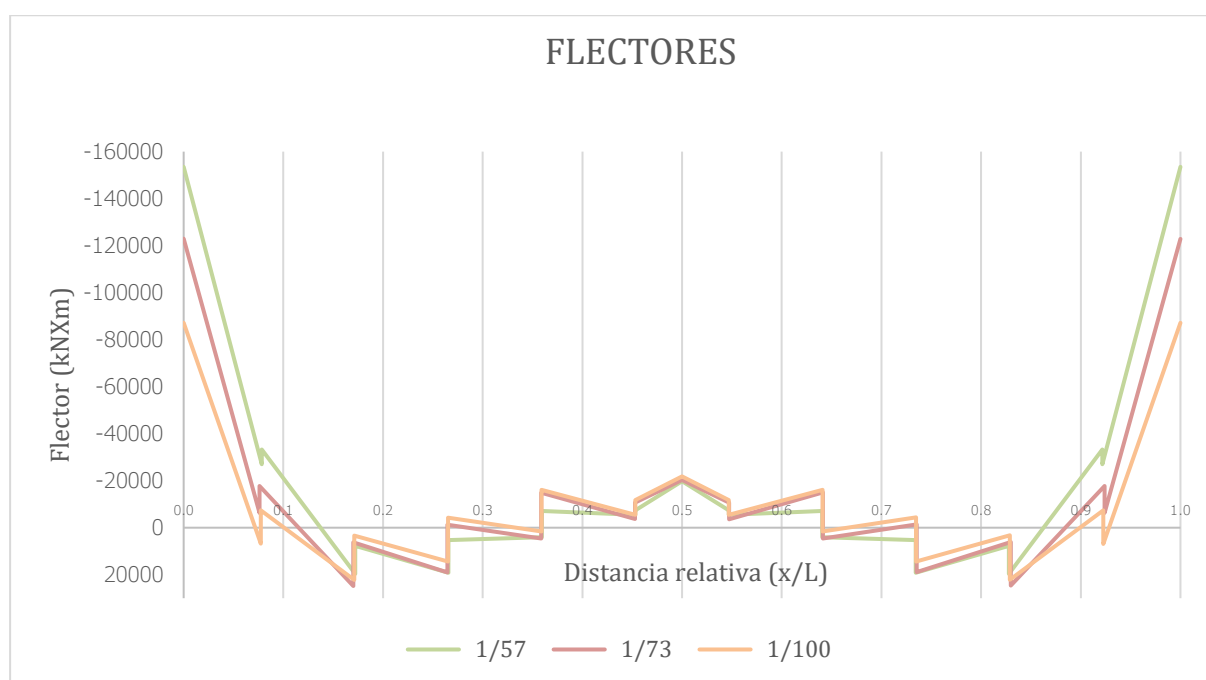


Figura 54. Flectores para el ajuste del canto del arranque. Casos en función de  $H/L$

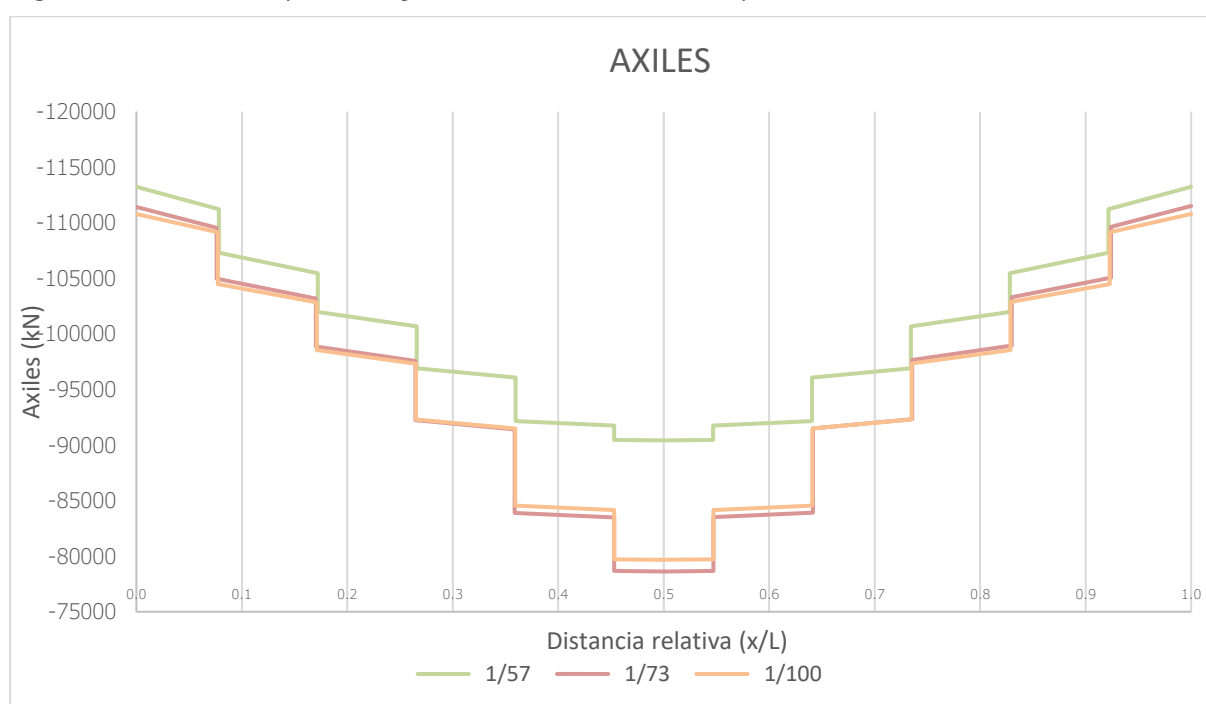


Figura 55. Axiles para el ajuste del canto del arranque. Casos en función de  $H/L$ .

Las principales conclusiones que se extraen de este análisis son:

- En las secciones de los arranques la variación introducida produce importantes reducciones del esfuerzo flector, con poca disminución del esfuerzo axial, originando una reducción de las excentricidades en estas secciones, del mismo orden de magnitud que el ajuste de la directriz. Este hecho implica que estas son las secciones cuyas excentricidades más se aproximarán al núcleo central.
- En las secciones de la zona central del arco se producen ligeros aumentos del flector, con importantes reducciones de los esfuerzos axiales, empeorando ligeramente las excentricidades, pero sin condicionar el diseño.
- El axial se mantiene prácticamente constante en la clave del arco entre los casos analizados con relaciones canto-luz correspondientes a 1/73 (3,30 m) y 1/100 (2,40 m).

Como puede intuirse en las gráficas anteriores a medida que se reduce el canto en el arranque, se está más cerca de lograr que todo el arco quede completamente comprimido por lo que lo lógico es tomar como solución a este ajuste el CANTO-5, correspondiente a un canto 2.40 m tanto en arranque como en clave. Las principales características de esta solución son:

- Se logra una considerable reducción de la carga flectora en los arranques, de aproximadamente un 44 % respecto a la situación de partida. Esta reducción se corresponde con una merma en las excentricidades de 0.92 m.
- Se reduce ligeramente el axial del arco, lo cual supone que los empujes que se transmiten al terreno supongan un incremento del 57 %, respecto los valores iniciales, en lugar del 68 % correspondiente al ajuste de la directriz sin modificar el canto en el arranque.

En la siguiente gráfica, Figura 56, puede verse la evolución de las líneas de presiones; para las situaciones solo con la directriz ajustada (1/57), situación

intermedia (1/73) y solución adoptada (1/100). Adicionalmente, se representan el núcleo central solo para la solución adoptada, dado que es única para un canto dado.

No se representan el resto de las líneas de presiones de cara a facilitar la exposición de este trabajo, porque en todos los casos la variación de los distintos esfuerzos es completamente análoga.

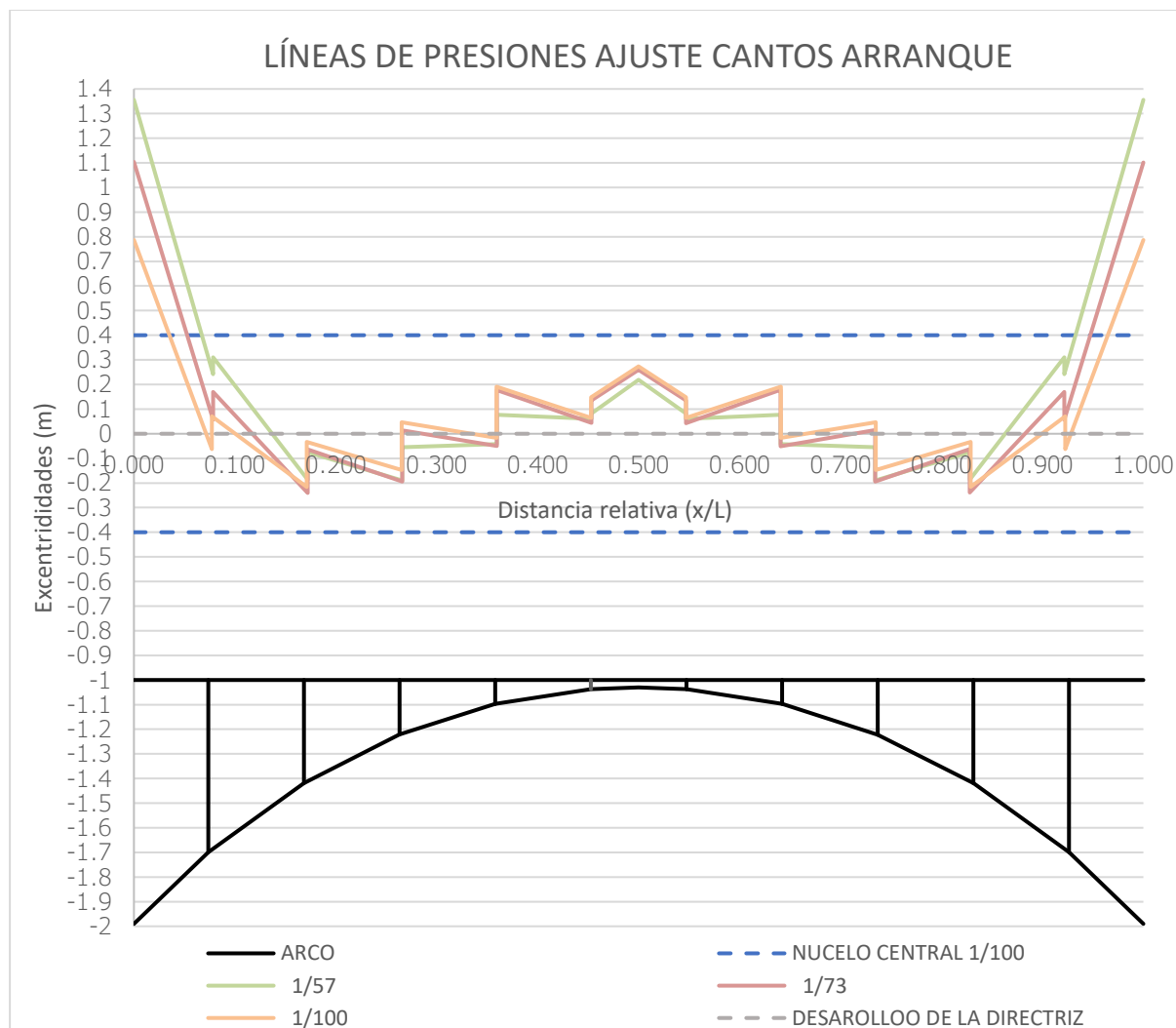


Figura 56. Líneas de presiones para el ajuste del canto del arranque.

Puede apreciarse en la gráfica de la Figura 56 como mejora el comportamiento del arco en las cercanías de los arranques y empeora ligeramente en las secciones más próximas al centro luz.

#### 5.4.4 SECCIÓN TRANSVERSAL. CANTO EN CLAVE.

Una vez que se ha fijado el valor del canto del arranque se procede a reducir el canto en clave del arco, manteniendo fijo el primero, para refinar el proceso de ajuste.

La reducción de canto que se proponen en este apartado es completamente análoga a lo ya visto para el canto en el arranque, pues su objetivo es el mismo, reducir los flectores disminuyendo la rigidez y el peso propio del arco.

##### 5.4.4.1 CASOS Y CRITERIOS

Para este apartado se proponen cinco reducciones del canto en clave a intervalos de 0,3 m, aproximadamente un 13 % del valor inicial (Tabla 6).

CASO	H(m)	h(m)	R(h/L)
CANTO-5	2,40	2,40	1/100
CANTO-6	2,40	2,10	1/114
CANTO-7	2,40	1,80	1/133
CANTO-8	2,40	1,50	1/160
CANTO-9	2,40	1,20	1/200
CANTO-10	2,40	1,00	1/240

TABLA 6. CASOS DE ANÁLISIS. CANTO EN CLAVE.

Como la esbeltez inicial del canto en clave es ya muy baja, relación canto-luz de 1/100, en este caso, el objetivo que se marca para reducir el valor del canto en clave consiste en realizar una serie de tanteos hasta un valor del canto de la mitad del valor inicial, correspondiente con una relación canto-luz de 1/240.

Adicionalmente el caso CANTO-10 se define en base a los resultados que se extraen en el siguiente apartado.

##### 5.4.4.2 RESULTADOS

Aunque se han calculado los flectores, axiles y excentricidades de todos los casos por simplicidad para su representación en las siguientes figuras, Figura 57 y Figura 58, solo se representan los resultados para los casos: inicial (1/100),

situación intermedia (1/133) y final (1/200). Las principales características de estas situaciones son

- Respecto al flector debe mencionarse que este disminuye en las zonas de los arranques y aumenta, en las zonas próximas a la sección centro luz.
- El axil, al igual que en el caso del canto del arranque disminuye más en la clave que en los arranques.

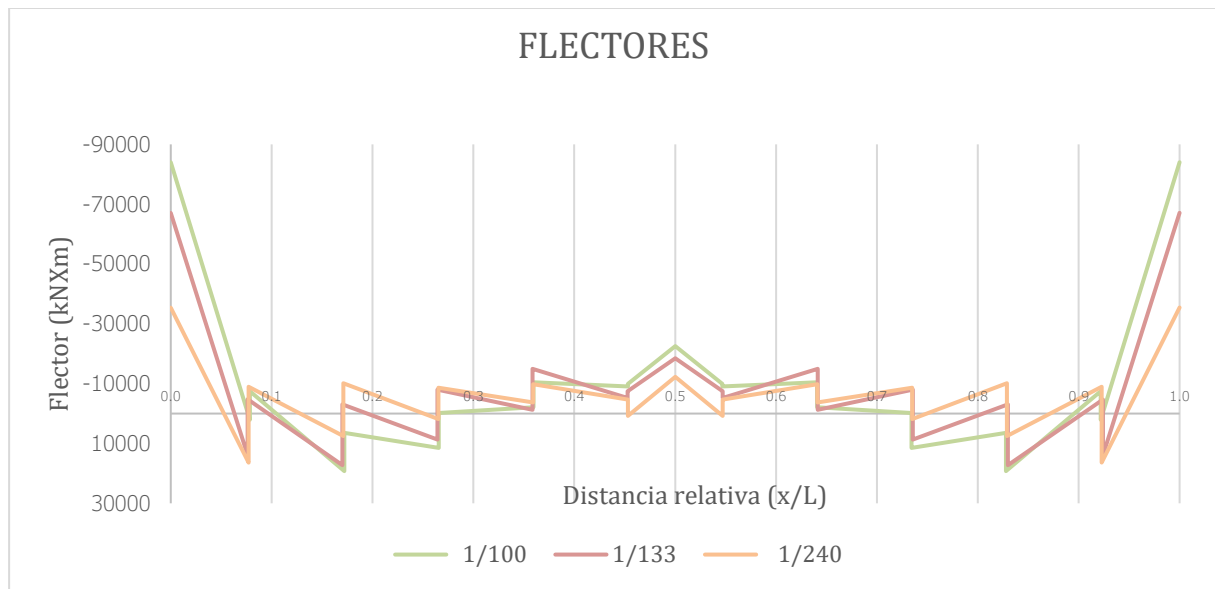


Figura 57. Flectores para el ajuste del canto en clave.

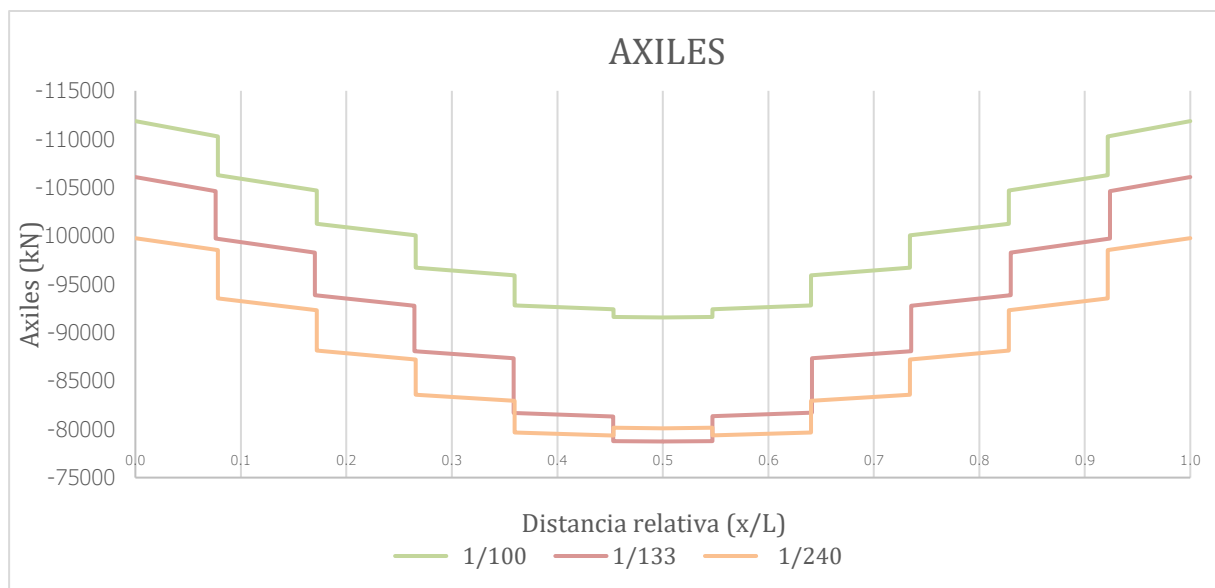


Figura 58. Flectores para el ajuste del canto en clave.

Este nuevo caso se incluye junto a la situación inicial de este apartado y la situación intermedia, correspondiente a relaciones canto clave-luz de 1/100 y 1/333.

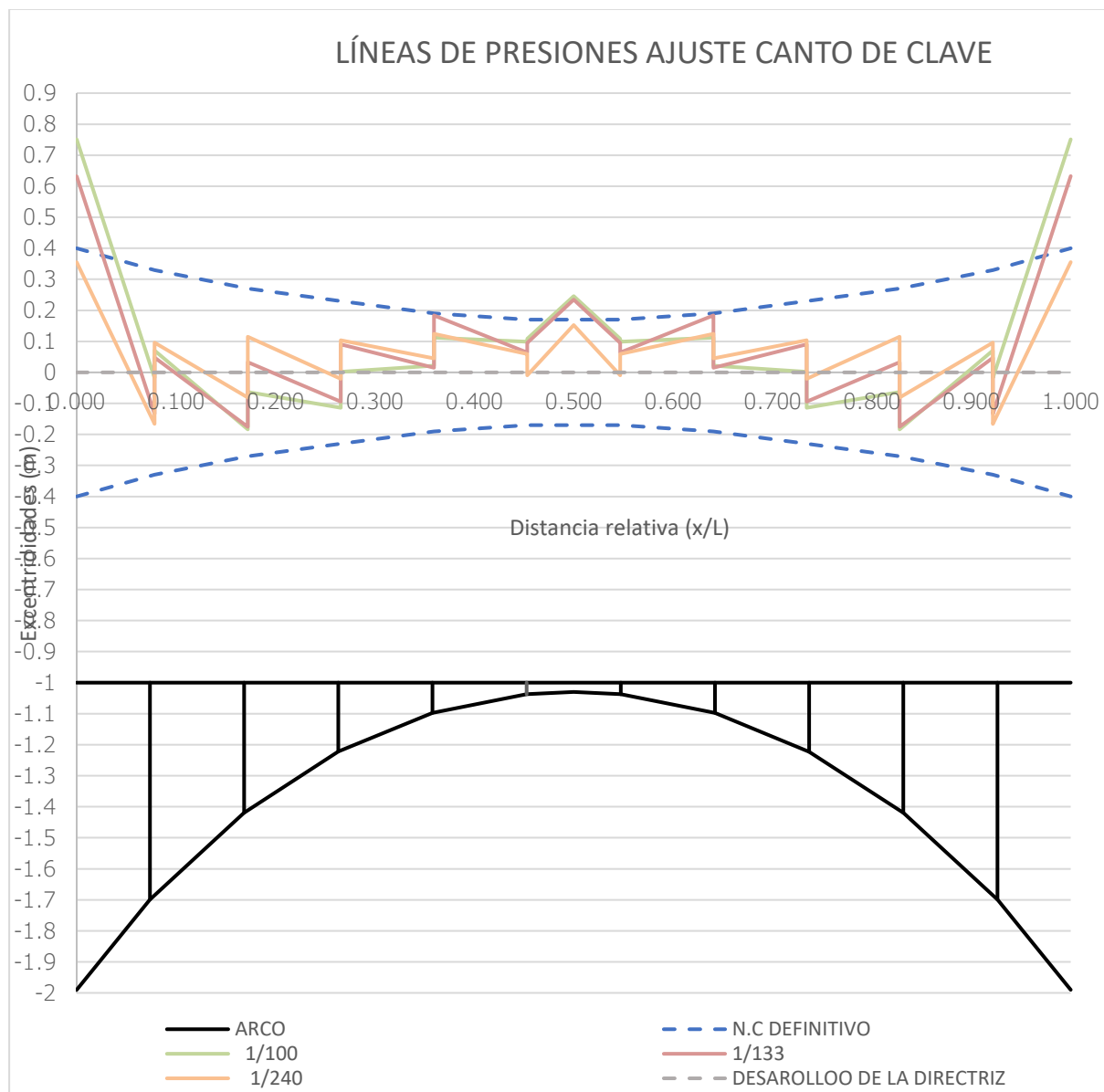


Figura 59. Líneas de presiones para el ajuste del canto en clave.

Como puede verse en la Figura 59, la nueva solución propuesta, llamada CANTO-10, correspondiente a un canto en el arranque de 1,00 m (relación canto-luz 1/240) garantiza, como se intuía, que toda la línea de presiones se encuentra dentro del núcleo central, motivo por el cual se considera esta situación como definitiva para el ajuste del canto.



#### 5.4.5 COMPROBACIONES FRENTE A LAS CARGAS DE TRÁFICO.

En este apartado, una vez fijada la directriz y las secciones transversales óptimas se procede a comprobar si el arco se encuentra comprimido y cuáles son los empujes máximos que se transmiten al terreno, añadiendo a la situación permanente la acción de las cargas de tráfico.

##### 5.4.5.1 ENVOLVENTES DE FLECTORES Y LINEAS DE PRESIONES

En primer lugar, se procede a analizar si la línea de presiones se mantiene dentro de los núcleos centrales del arco, para las situaciones de flectores máximos o pésimos, pues son estas las situaciones más desfavorables para la línea de presiones, cuando existe tráfico sobre el viaducto.

Las cargas que se emplean para este apartado son las correspondientes a la combinación ENVOLVENTE-1, definida en el apartado 5.3.2, para la cual solo se considera la acción de la sobrecarga en un sentido de circulación.

En la siguiente imagen se muestran los resultados obtenidos del cálculo de las envolventes definiéndose tres líneas de presiones:

- PERMANENTE: es la línea de presiones correspondiente a las cargas de peso propio y muertas tras haber optimizado la directriz y las secciones transversales del arco.
- ENVOLVENTE 1 M max+: se corresponde con la línea de presiones envolvente de las situaciones de máxima flexión positiva.
- ENVOLVENTE 1 M max-: se corresponde con la envolvente de las líneas de presiones para las situaciones de máxima flexión negativa.

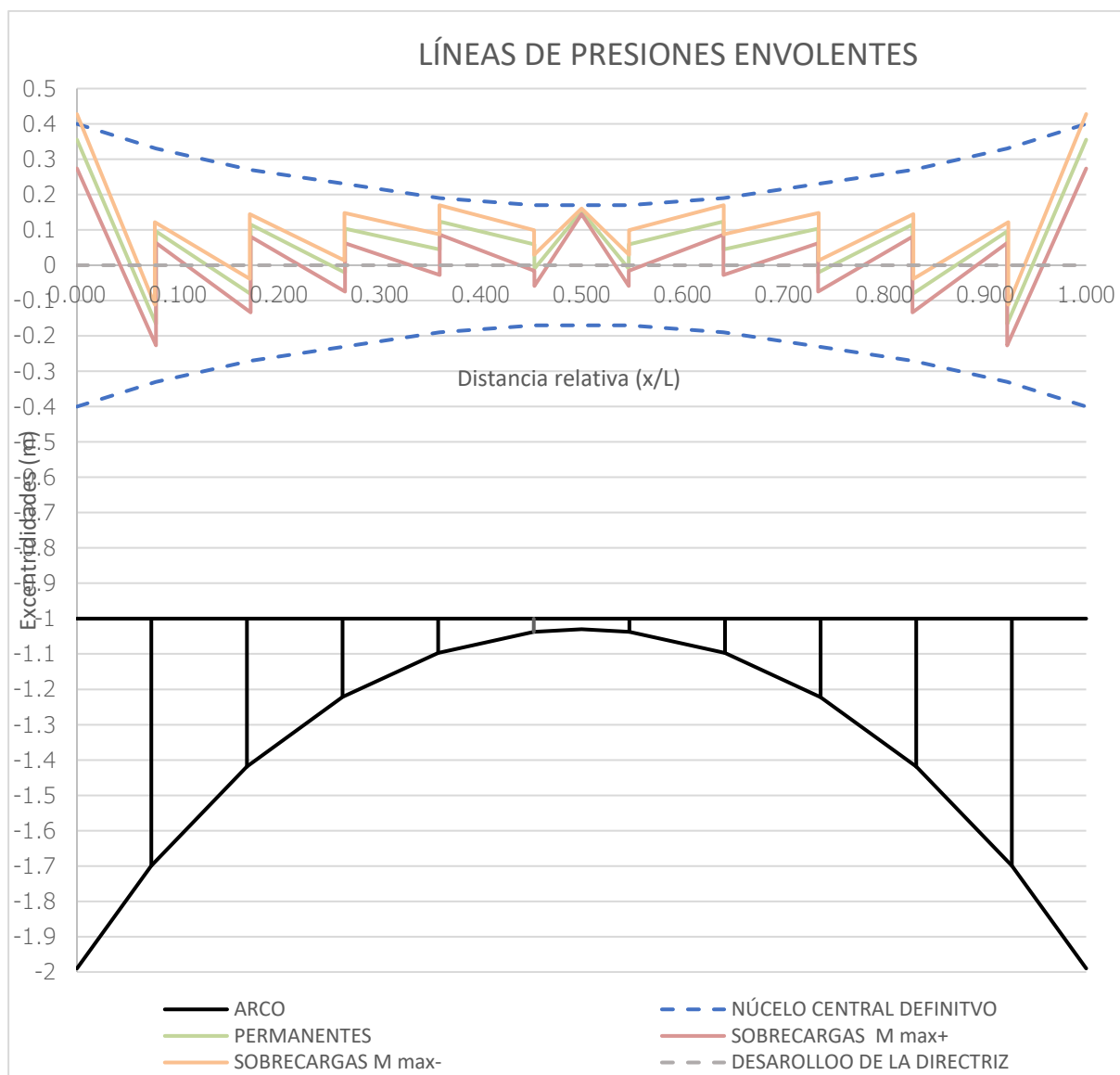


Figura 60. Líneas de presiones para las envolventes de las cargas de tráfico.

En base a los resultados que se muestran en la puede afirmar que la optimización realizada con anterioridad es completamente válida. Las principales características que llevan a afirmar este hecho son:

- Todo el arco se encuentra comprimido, salvo en las secciones de los arranques, cuando las cargas del tráfico se ubican en la situación de máxima flexión negativa para estas secciones.
- Tomando como referencia la situación de cargas permanentes, base del proceso de optimización, se observa que se han reducido las excentricidades de los arranques de 1,72 m a 0,36 m, prácticamente un 80 %.

- Se produce una reducción muy importante de los esfuerzos flectores, comparando los flectores para las cargas permanentes, observándose una disminución de: -123328 a -35444 kNxm, aproximadamente un 72 %, en las secciones de arranques y de -25852 a -12241 kNxm, un 53 %, para la sección centro luz. Esta reducción se ve claramente en la Figura 61.

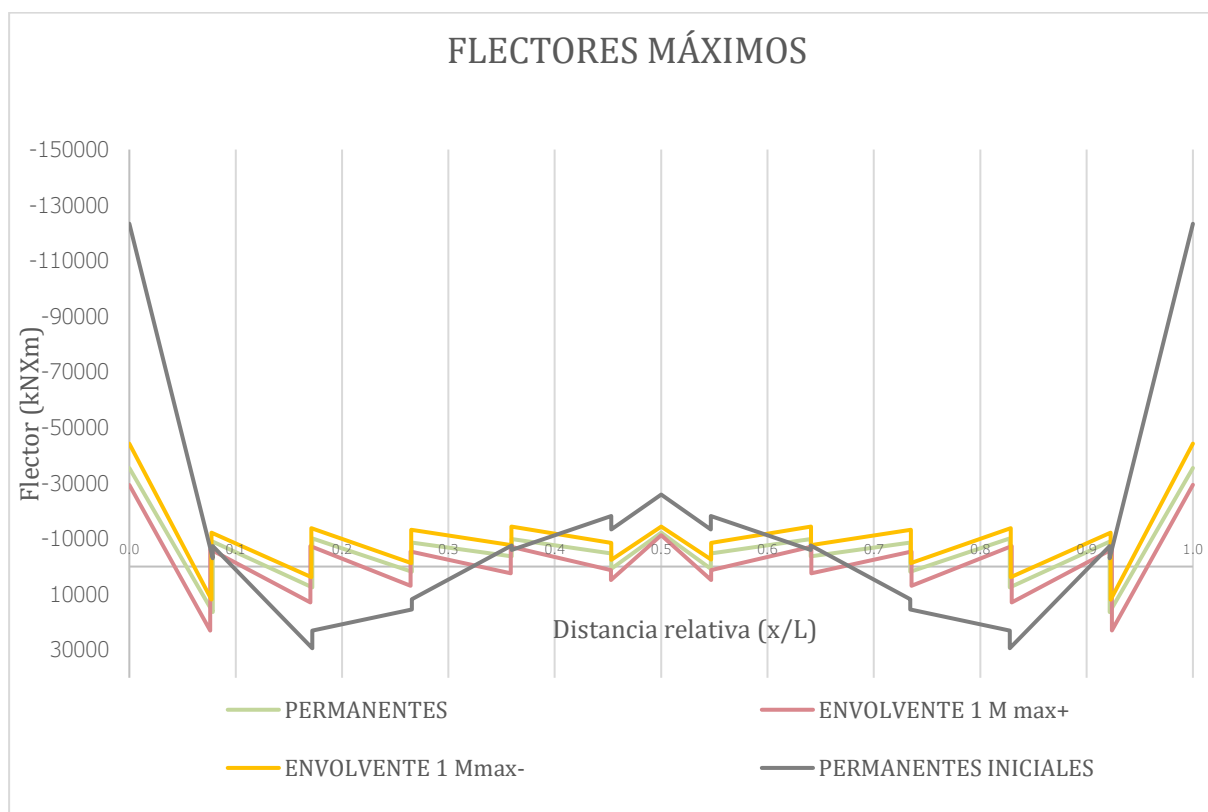


Figura 61. Flectores máximos sobre el arco.

- La sección en centro luz se encuentra completamente comprimida independientemente de la ubicación de las cargas del tráfico. En este caso la excentricidad de las cargas permanentes se ha reducido de 0,56 m a 0,16 m, un 72 % igual que la reducción de las excentricidades debido a la disminución del canto.

#### 5.4.5.2 ENVOLVENTES DE AXILES Y EMPUJES AL TERRENO

Estrictamente la optimización del arco solo depende de las cargas consideradas, si bien existen otra serie de condicionantes que pueden influir de forma muy importante en el proceso de optimización, como es el caso de los empujes que se transmiten al terreno.

Al igual que en el apartado anterior se representan 3 situaciones:

- PERMANENTE: es la línea de presiones correspondiente a las cargas de peso propio y muertas tras haber optimizado la directriz y la sección.
- ENVOLVENTE 1 N max+: se corresponde con la línea de presiones envolvente de las situaciones de máximo axil positiva.
- ENVOLVENTE 1 N max-: se corresponde con la envolvente de las líneas de presiones para las situaciones de máximo axil negativo.

En la siguiente imagen, puede observarse los resultados para las envolventes de axiles. Los principales resultados que se extraen de este análisis son:

- Los valores de los esfuerzos axiles máximos solo difieren en un 9% respecto a los correspondientes a la situación en la que solo actúan las cargas permanentes (Figura 62).
- Los empujes al terreno máximos son prácticamente iguales, tanto para cuando solo actúa el peso propio y las cargas muertas como para la envolvente de los axiles mínimos considerando, también la acción de las sobrecargas.
- En los empujes, bajo la situación de cargas permanentes, los esfuerzos de compresión del arco en arranques aumentan de -70005 a -99761 kN, lo que representa un aumento total de los empujes al terreno del 42 %.
- El axil en clave para la combinación de cargas permanentes aumenta de -46488 a -80109 kN, produciéndose un aumento igual al de los arranques del 42 %.

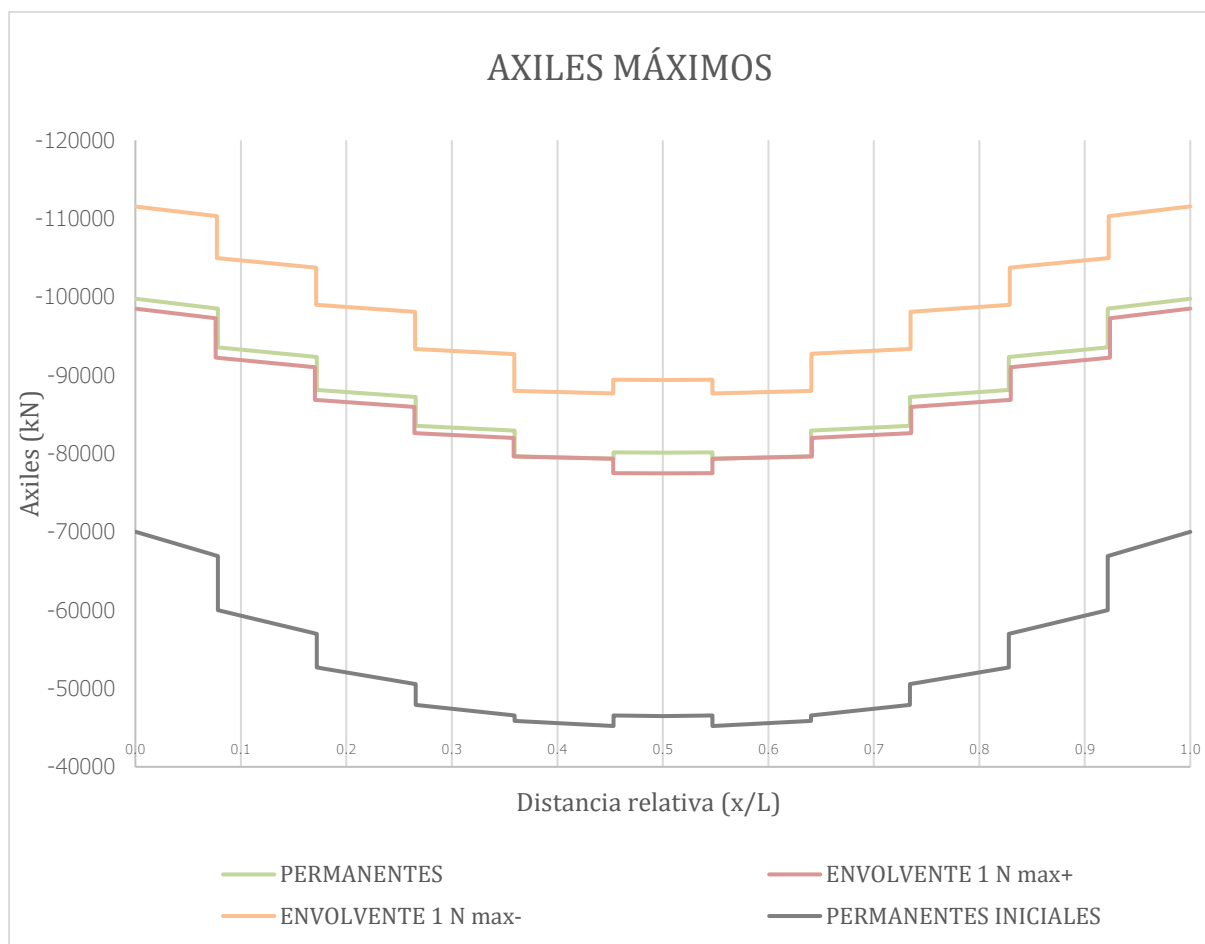


Figura 62. Envolvente de esfuerzos axiales.

El hecho de que aumenten los empujes es una consecuencia directa de rebajar el arco, disminuir la relación flecha luz, como ya se vio durante el ajuste de la directriz.

En el caso del presente trabajo, a falta de la información geotécnica se dan por asumibles los incrementos de los empujes indicados, al igual que en el apartado 5.4.2.2. En un caso real, debe valorarse si la mejora en el comportamiento del arco compensa el encarecimiento de las cimentaciones o si estas son viables.

#### 5.4.6 RESULTADO DE LA OPTIMIZACIÓN.

Recapitulando los resultados de los distintos apartados realizados con antelación, se toma como solución definitiva del arco optimizado, la correspondiente al caso analizado CANTO-10. Las principales características de esta solución son:

- La directriz parabólica pasa a tener una luz de 240 m y 31 m de flecha, siendo por tanto su relación flecha-luz de 1/8.
- Las nuevas secciones rectangulares bicelulares mantienen los valores de partida para sus almas y alas, pero los cantos se reducen en los arranques a 2,4 m, relación canto-luz 1/100, y 1 m en la sección de clave, relación canto-luz de 1/240. El ancho se mantiene en el valor original.

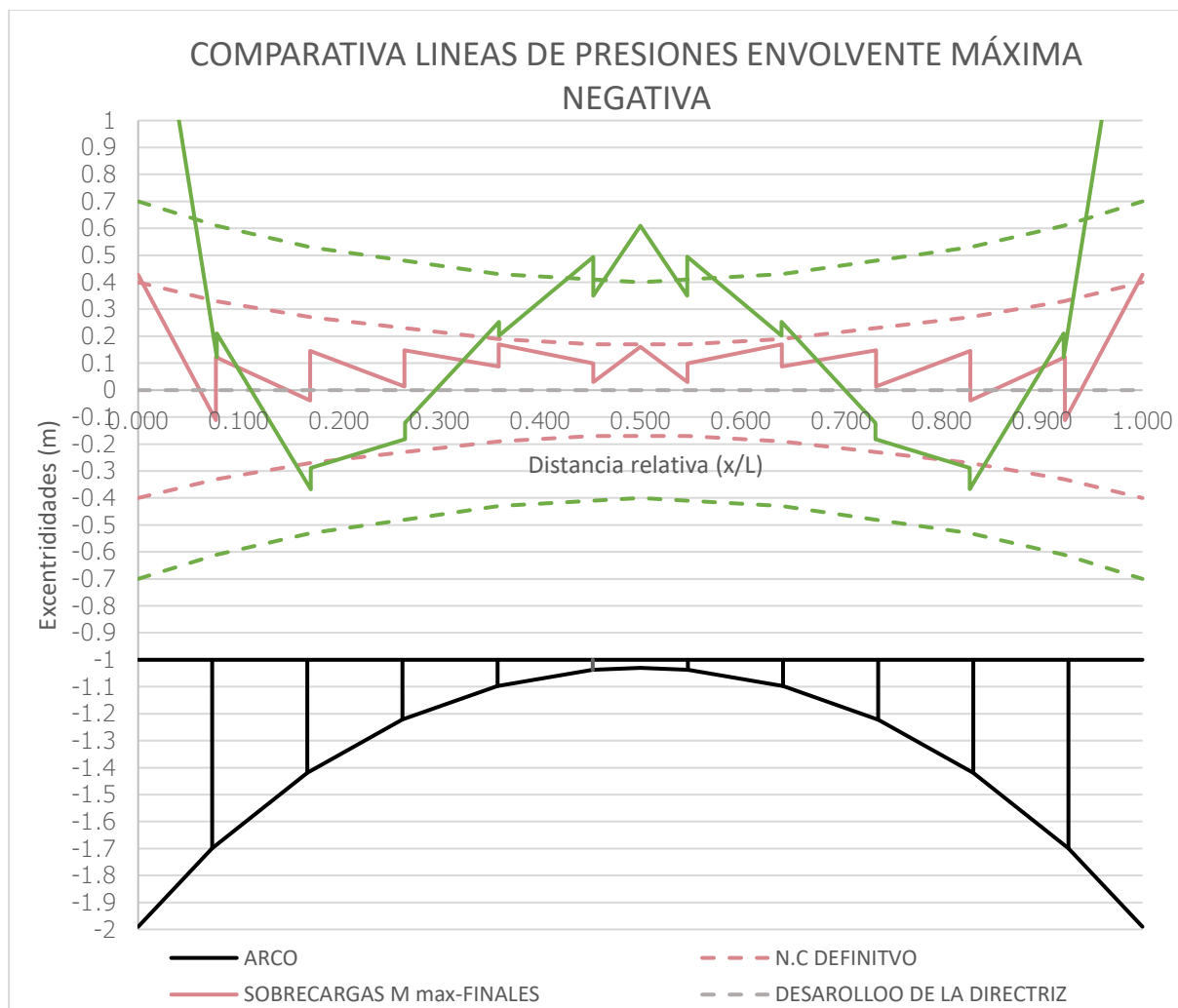


Figura 63. Envolventes de las líneas de presiones inicial y final. Máxima flexión negativa.



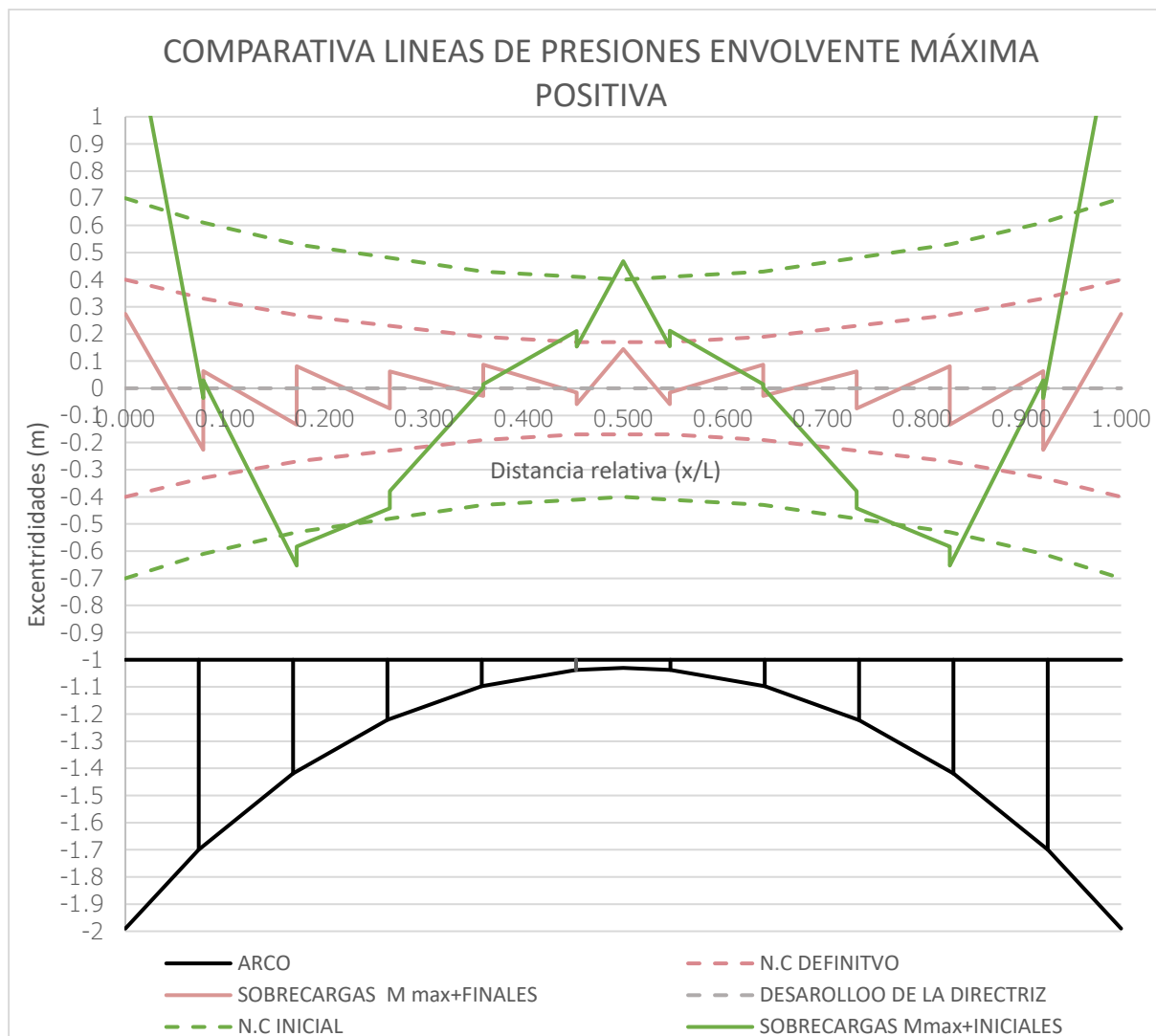


Figura 64. Envolventes de las líneas de presiones inicial y final. Máxima flexión positiva.

En las Figura 63 y Figura 64, se muestran los resultados del encaje de las envolventes de máxima flexión, tanto negativa como positiva, para las situaciones inicial y final. En estas imágenes se observa claramente como se ha mejorado el comportamiento del puente.

Adicionalmente en la Figura 65 se muestra el resultado visual del puente inicial y la solución final, tras el proceso de ajuste.

A simple vista puede observarse que la solución adoptada, es mucho más esbelta, que la solución inicial.

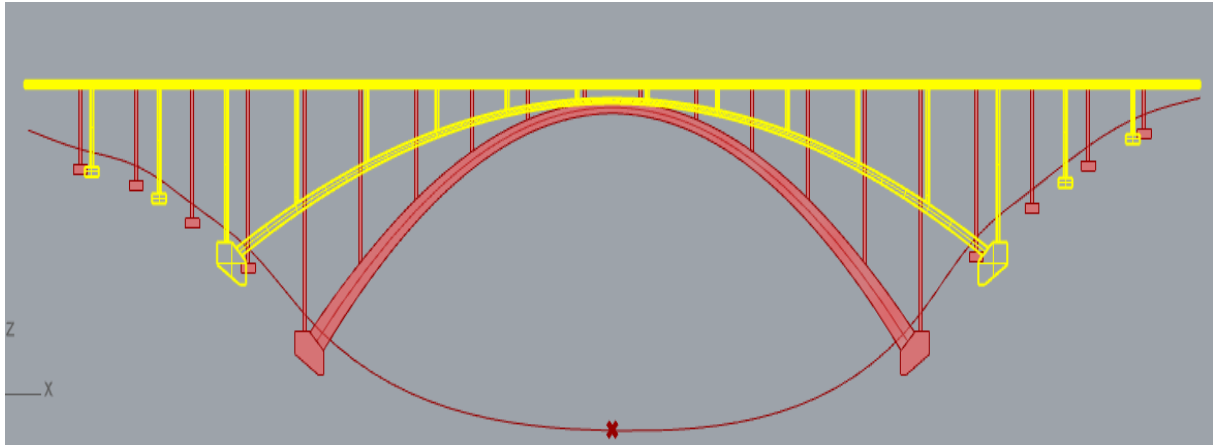


Figura 65. Comparativa visual entre viaducto optimizado (amarillo) y el inicial (rojo).

Como puede verse en esta figura se observa claramente una importante reducción del volumen del puente, pasando de 13046 a 9083 m<sup>3</sup>. Esta merma en el volumen de hormigón representa un 30 %. Este hecho muestra el potencial teórico de optimización y ahorro de hormigón además del de acero de las armaduras fruto de la reducción de los flectores.

## 6 CONCLUSIONES

### 6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se resumen las principales conclusiones, que se extraen del trabajo realizado, en relación con las implicaciones del diseño paramétrico en la ingeniería civil, las características de un modelo paramétrico y su potencial de optimización que tienen en la ingeniería de puentes.

### 6.2 SOBRE EL DISEÑO PARAMÉTRICO

- Las técnicas de diseño paramétrico no son nada novedosas, datan de la segunda mitad del siglo XIX.
- Su uso práctico solo ha sido posible gracias al desarrollo y evolución de computadoras y software.
- En ingeniería civil, se esté empezando a utilizar de manera generalizada para realizar diseños estructurales, permitiendo realizar los primeros modelos integrado de definición geométrica y cálculo estructural.

### 6.3 SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO PARAMÉTRICO

- Los modelos paramétricos no sirven para realizar tanteos de las distintas tipologías de los elementos, por ejemplo, en cada tipo de sección deben definirse una serie de parámetros distintos, lo cual supone un mayor esfuerzo de programación.
- Un buen diseño paramétrico, tiene que contar con criterios ingenieriles, aparte de los geométricos. De esta forma se logra un diseño óptimo, al relacionar variables geométricas, independientes entre sí con criterios técnicos. Para ilustrar este hecho, se pone como ejemplo las limitaciones introducidas mediante el rango de las relaciones flecha-luz del arco, entre otras, pues de esta forma se establece que las soluciones que se construyen con el modelo paramétrico tienen sentido y coherencia ingenieril.

- La utilización de programas de diseño paramétrico basados en programación visual, como es el caso de Grasshopper, presentan una curva de aprendizaje sencilla y rápida para cualquier usuario.

## 6.4 SOBRE EL ANÁLISIS Y LA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

- El nuevo arco propuesto se caracteriza por:
  - Tener una directriz de 240 m de luz y 31 m de flecha, relación flecha-luz 1/8.
  - Secciones transversales de ancho igual a la inicial, y cantos de 2,40 m en los arranques y 1 m en centro luz, lo cual suponen unas esbelteces de 1/100 de 1/240, respectivamente.
- Los parámetros del arco se encuentran en un rango habitual, salvo el valor del canto en clave, como prueba en las relaciones flecha-luz y canto-luz. Este valor se justifica, asumiendo que para el trabajo teórico realizado no se han introducido:
  - Variaciones en los parámetros de las pilas y el tablero.
  - Reducción del canto en arranque a una relación 1/120, valor bastante usual en puentes esbeltos.
- En líneas generales se afirma que el proceso de mejora realizado en el arco de la Regenta se ajusta con la evolución de los puentes arcos proyectados por Juan José Arenas, pasando de un puente arco macizo y bastante apuntado a otro esbelto y rebajado, con un gran ancho.
- La reducción de los cantos manteniendo el elevado ancho, supone que el puente se acerque al comportamiento de los puentes de tipo laminar, solución ampliamente utilizada por Arenas en sus puentes.
- El proceso de optimización debe comenzar siempre por la directriz, pues es este ajuste el que condiciona los axiles del arco y los empujes que se transmiten al terreno.

- En relación con los resultados de la optimización realizada las conclusiones más importantes que se extraen son:
  - La disminución del esfuerzo flector en las peores secciones es entre un 72 %, en las secciones de arranques, y un 53 %, logrando que prácticamente todo el arco esté comprimido. Además, se logra una reducción del volumen total del viaducto del 30 %.
  - Los axiles que se trasmiten al terreno son un 42 % más de los iniciales.
  - El ajuste de la directriz produce unas reducciones de las excentricidades, respecto a los valores iniciales. en las secciones de los arranques y en clave del 19 % y del 55 %.
  - El ajuste del canto en el arranque supone unas reducciones de las excentricidades, respecto a los valores iniciales, del 55 % y 51 %, produciéndose unos incrementos parciales del 36 % y del -4 % respecto al ajuste de la directriz.
  - El ultimo ajuste, correspondiente al canto en clave, provoca una merma en las excentricidades total, comparada con la situación de partida del 80 % y del 73 % para las secciones de arranques de arranque y clave. En este caso los incrementos parciales de las excentricidades son del 25 % y del 22 %.
  - El punto clave para lograr comprimir completamente el arco, bajo la acción de las cargas permanentes consideradas, ha sido el flexibilizar los arranques pues este ajuste el que mayor disminución de las excentricidades provoca en las secciones de los empotramientos.
  - La flexibilización del arco efectuada reduciendo el canto en clave, aunque de importancia, es claramente menor, pues el encaje de la sección en clave se debe principalmente al ajuste de la directriz.

## 6.5 CONCLUSIONES GLOBALES

Más allá de la solución propuesta en este trabajo, que tiene sus limitaciones al tratarse de un ejercicio académico, debe resaltarse la importancia que tiene el poder realizar un modelo paramétrico asociado a un modelo estructural por:

- La versatilidad y facilidad para de optimizar ideas, y estudiar alternativas. Clave para hacer, por un lado, diseños eficientes desde el punto de vista del análisis estructural.
- La capacidad de adaptación a modificaciones que surgen durante el proyecto y construcción que no tienen que ver con el ámbito estructural (modificaciones de trazado, de galibo, etc.). Estas modificaciones pueden penalizar mucho el trabajo del diseño, tanto económicamente como en plazos, si no existe un modelo paramétrico fácilmente adaptable.



## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Arenas, J. J. (Febreo de 2015). Puentes Arco. Evolución y comprensión. *Revista de Obras Públicas*, 162(3562), 9-22.
- Arenas, J. J., Hacar Rodríguez, F., García-Arango Cienfuegos-Jovellanos, I., González González, M., Gurriarán Canalejas, R., & Pantaleón Prieto Marcos, J. (1997). Carretera nacional 632 de Ribadesella a Lluarca. Tramo Novellana-Cavadeo. Arco de la Regenta, Viaducto Pintor Fierros. *Revista de Obras Públicas*(3363), 33-41.
- Capellán Miguel, G., Merino Rasillo, E., & Guil Celada, Y. (2020). Bases de diseño, modelización, cálculo y comportamiento del viaducto de Almonte. *Hormigón y Acero*, 71(291-292), 23-42.
- Daniel, D. (2013). En *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models*. Pdh tesis. (págs. 14-68). RMIT University.
- es.BIM. (2016). *BIM en 8 puntos*.
- García-Arango Cienfuegos-Jovellanos, I., Fernández-Nespral Pérez, C., Pantaleón Prieto, M. J., & Ramos Gutiérrez, O. (2009). Ampliación del viaducto del Pintor Fierros (Arco de La Regenta). *Revista de Obras Públicas*, 156 (3495), 31-40.
- Manterola, J. (2006). Capítulo 17:El puente arco. En *Puentes:Apuntes para su diseño,cálculo y construcción* (Vol. II, págs. 897-975). Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.
- Ramos Gimena, F., & Valdenebro García, J. V. (1993). Estructuras y cimentaciones. Núcleo central de la sección. *Revista de Edificación*(16), 33-35.
- Rosana, N. (2018). El papel del Gobierno en la implementación del BIM es España. *Revista de Obras Públicas*, 159(3597), 10-13.

## 8 ANEJO-1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

### 8.1 AJUSTE DE LA DIRECTRIZ

DIRECTRIZ-1				DIRECTRIZ-2			
L (m)	f (m)	f/L	-	L (m)	H (m)	f/L	-
190.00	48.00	1/4	-	220.00	37.00	1/6	-
x/L		N	e	x/L	M	N	e
-	kN*m	KN	m	-	kN*m	KN	m
0.0	-123328	-70005	1.76	0.0	-137874	-90662	1.52
0.1	-2989	-66917	0.04	0.1	-12075	-88213	0.14
0.1	-7389	-60000	0.12	0.1	-18689	-83013	0.23
0.2	29385	-56979	-0.52	0.2	25512	-80709	-0.32
0.2	23078	-52696	-0.44	0.2	14389	-76862	-0.19
0.3	15390	-50564	-0.30	0.3	17737	-75236	-0.24
0.3	11747	-47910	-0.25	0.3	6665	-71813	-0.09
0.4	-7633	-46555	0.16	0.4	-726	-70780	0.01
0.4	-5963	-45870	0.13	0.4	-8821	-67610	0.13
0.5	-18132	-45215	0.40	0.5	-10299	-67111	0.15
0.5	-13312	-46568	0.29	0.5	-11026	-66141	0.17
0.5	-25852	-46488	0.56	0.5	-22762	-66079	0.34
0.5	-25852	-46488	0.56	0.5	-22762	-66079	0.34
0.5	-13350	-46568	0.29	0.5	-11035	-66141	0.17
0.5	-18166	-45217	0.40	0.5	-10301	-67115	0.15
0.6	-5954	-45872	0.13	0.6	-8824	-67614	0.13
0.6	-7628	-46556	0.16	0.6	-728	-70784	0.01
0.7	11757	-47910	-0.25	0.7	6666	-71817	-0.09
0.7	15401	-50565	-0.30	0.7	17739	-75240	-0.24
0.8	23059	-52697	-0.44	0.8	14373	-76866	-0.19
0.8	29366	-56980	-0.52	0.8	25495	-80713	-0.32
0.9	-7388	-60001	0.12	0.9	-18692	-83017	0.23
0.9	-2990	-66918	0.04	0.9	-12080	-88217	0.14
1.0	-123287	-70006	1.76	1.0	-137824	-90666	1.52

DIRECTRIZ-3				DIRECTRIZ-4			
L (m)	H (m)	f/L	-	L (m)	H (m)	f/L	-
240.00	31.00	1/8	-	260.00	26.00	1/10	-
x/L	M	N	e	x/L	M	N	e
-	kN*m	KN	m	-	kN*m	KN	m
0.0	-158583	-112059	1.42	0.0	-192093	-143239	1.34
0.1	-21432	-109976	0.19	0.1	-35030	-141471	0.25
0.1	-31007	-105470	0.29	0.1	-49272	-137157	0.36
0.2	24894	-103552	-0.24	0.2	24857	-135555	-0.18
0.2	7172	-99246	-0.07	0.2	-3071	-129934	0.02
0.3	22613	-97891	-0.23	0.3	30063	-128804	-0.23
0.3	1329	-92394	-0.01	0.3	-6151	-119752	0.05
0.4	7135	-91534	-0.08	0.4	18229	-119034	-0.15
0.4	-13879	-83497	0.17	0.4	-18808	-104693	0.18
0.5	-2180	-83088	0.03	0.5	8500	-104346	-0.08
0.5	-9861	-77886	0.13	0.5	-6249	-95084	0.07
0.5	-19264	-77835	0.25	0.5	-14184	-95041	0.15
0.5	-19264	-77835	0.25	0.5	-14184	-95041	0.15
0.5	-9700	-77886	0.12	0.5	-6263	-95084	0.07
0.5	-1876	-83163	0.02	0.5	8505	-104357	-0.08
0.6	-13803	-83578	0.17	0.6	-18832	-104704	0.18
0.6	7434	-91683	-0.08	0.6	18211	-119046	-0.15
0.7	1124	-92543	-0.01	0.7	-6154	-119764	0.05
0.7	22543	-98071	-0.23	0.7	30057	-128816	-0.23
0.8	6918	-99425	-0.07	0.8	-3089	-129946	0.02
0.8	24653	-103734	-0.24	0.8	24834	-135567	-0.18
0.9	-31098	-105653	0.29	0.9	-49297	-137168	0.36
0.9	-21538	-110157	0.20	0.9	-35056	-141481	0.25
1.0	-158399	-112239	1.42	1.0	-191937	-143249	1.34

## 8.2 AJUSTE DEL CANTO DEL ARRANQUE

CANTO-1				CANTO-2			
L (m)	H (m)	h (m)	H/L	L (m)	H (m)	h (m)	H/L
240.00	4.20	2.40	1/57	240.00	3.75	2.40	1/64
x/L	M	N	e	x/L	M	N	e
-	kN*m	KN	m	-	kN*m	KN	m
0.0	-158583	-112059	1.42	0.0	-139932	-111780	1.25
0.1	-21432	-109976	0.19	0.1	-13339	-109809	0.12
0.1	-31007	-105470	0.29	0.1	-23834	-105268	0.23
0.2	24894	-103552	-0.24	0.2	25052	-103424	-0.24
0.2	7172	-99246	-0.07	0.2	6892	-99102	-0.07
0.3	22613	-97891	-0.23	0.3	20807	-97781	-0.21
0.3	1329	-92394	-0.01	0.3	-18	-92369	0.00
0.4	7135	-91534	-0.08	0.4	5819	-91520	-0.06
0.4	-13879	-83497	0.17	0.4	-14438	-83735	0.17
0.5	-2180	-83088	0.03	0.5	-2920	-83327	0.04
0.5	-9861	-77886	0.13	0.5	-10304	-78299	0.13
0.5	-19264	-77835	0.25	0.5	-19848	-78248	0.25
0.5	-19264	-77835	0.25	0.5	-19848	-78248	0.25
0.5	-9700	-77886	0.12	0.5	-10190	-78299	0.13
0.5	-1876	-83163	0.02	0.5	-2709	-83378	0.03
0.6	-13803	-83578	0.17	0.6	-14418	-83792	0.17
0.6	7434	-91683	-0.08	0.6	6026	-91633	-0.07
0.7	1124	-92543	-0.01	0.7	-178	-92482	0.00
0.7	22543	-98071	-0.23	0.7	20751	-97917	-0.21
0.8	6918	-99425	-0.07	0.8	6711	-99238	-0.07
0.8	24653	-103734	-0.24	0.8	24876	-103561	-0.24
0.9	-31098	-105653	0.29	0.9	-23881	-105407	0.23
0.9	-21538	-110157	0.20	0.9	-13401	-109946	0.12
1.0	-158399	-112239	1.42	1.0	-139788	-111916	1.25

CANTO-3				CANTO-4			
L (m)	H (m)	h (m)	H/L	L (m)	H (m)	h (m)	H/L
240.00	3.30	2.40	1/73	240.00	2.85	2.40	1/84
x/L	M	N	e	x/L	M	N	e
-	kN*m	KN	m	-	kN*m	KN	m
0.0	-122976	-111414	1.10	0.0	-105120	-111112	0.95
0.1	-6235	-109548	0.06	0.1	561	-109356	-0.01
0.1	-17758	-104967	0.17	0.1	-12177	-104734	0.12
0.2	24805	-103192	-0.24	0.2	23698	-103033	-0.23
0.2	6251	-98858	-0.06	0.2	4888	-98705	-0.05
0.3	18990	-97569	-0.19	0.3	16667	-97451	-0.17
0.3	-1306	-92255	0.01	0.3	-2898	-92269	0.03
0.4	4538	-91418	-0.05	0.4	3087	-91444	-0.03
0.4	-14917	-83900	0.18	0.4	-15552	-84201	0.18
0.5	-3662	-83493	0.04	0.5	-4480	-83794	0.05
0.5	-10680	-78669	0.14	0.5	-11214	-79142	0.14
0.5	-20388	-78618	0.26	0.5	-21055	-79091	0.27
0.5	-20388	-78618	0.26	0.5	-21055	-79091	0.27
0.5	-10635	-78669	0.14	0.5	-11191	-79142	0.14
0.5	-3564	-83521	0.04	0.5	-4429	-83809	0.05
0.6	-14964	-83932	0.18	0.6	-15578	-84218	0.18
0.6	4660	-91500	-0.05	0.6	3144	-91486	-0.03
0.7	-1431	-92337	0.02	0.7	-2967	-92311	0.03
0.7	18946	-97669	-0.19	0.7	16634	-97501	-0.17
0.8	6124	-98958	-0.06	0.8	4829	-98755	-0.05
0.8	24679	-103293	-0.24	0.8	23633	-103083	-0.23
0.9	-17778	-105068	0.17	0.9	-12166	-104784	0.12
0.9	-6268	-109648	0.06	0.9	563	-109405	-0.01
1.0	-122876	-111513	1.10	1.0	-105082	-111161	0.95

CANTO-5			
L (m)	H (m)	h (m)	H/L
240.00	2.40	1.80	1/100
x/L	M	N	e
-	kN*m	KN	m
0.0	-87141	-110784	0.79
0.1	6815	-109140	-0.06
0.1	-7403	-104478	0.07
0.2	22224	-102850	-0.22
0.2	3306	-98541	-0.03
0.3	14374	-97320	-0.15
0.3	-4306	-92300	0.05
0.4	1575	-91486	-0.02
0.4	-16139	-84558	0.19
0.5	-5450	-84151	0.06
0.5	-11798	-79723	0.15
0.5	-21823	-79672	0.27
0.5	-21823	-79672	0.27
0.5	-11809	-79723	0.15
0.5	-5452	-84157	0.06
0.6	-16143	-84564	0.19
0.6	1573	-91492	-0.02
0.7	-4326	-92306	0.05
0.7	14347	-97325	-0.15
0.8	3300	-98546	-0.03
0.8	22208	-102854	-0.22
0.9	-7370	-104482	0.07
0.9	6846	-109144	-0.06
1.0	-87159	-110788	0.79



### 8.3 AJUSTE DEL CANTO EN CLAVE

CANTO-6				CANTO-7			
L (m)	H (m)	h (m)	h/L	L (m)	H (m)	h (m)	h/L
240	2.40	2.10	1/114	240	2.40	1.80	1/133
x/L	M	N	e	x/L	M	N	e
-	kN*m	KN	m	-	kN*m	KN	m
0.0	-77370	-108439	0.71	0.0	-67088	-106082	0.63
0.1	10677	-106881	-0.10	0.1	13965	-104610	-0.13
0.1	-5589	-102108	0.05	0.1	-4747	-99721	0.05
0.2	20067	-100566	-0.20	0.2	17245	-98264	-0.18
0.2	310	-96194	0.00	0.2	-3077	-93856	0.03
0.3	11555	-95037	-0.12	0.3	8742	-92763	-0.09
0.3	-6338	-90153	0.07	0.3	-7962	-88081	0.09
0.4	-2	-89382	0.00	0.4	-1276	-87352	0.01
0.4	-15849	-83049	0.19	0.4	-14974	-81701	0.18
0.5	-5487	-82664	0.07	0.5	-5204	-81336	0.06
0.5	-9950	-79113	0.13	0.5	-7482	-78782	0.09
0.5	-20427	-79065	0.26	0.5	-18488	-78736	0.23
0.5	-20427	-79065	0.26	0.5	-18488	-78736	0.23
0.5	-9960	-79113	0.13	0.5	-7491	-78782	0.10
0.5	-5488	-82669	0.07	0.5	-5204	-81341	0.06
0.6	-15851	-83054	0.19	0.6	-14975	-81705	0.18
0.6	-2	-89387	0.00	0.6	-1275	-87358	0.01
0.7	-6354	-90159	0.07	0.7	-7974	-88086	0.09
0.7	11532	-95042	-0.12	0.7	8724	-92767	-0.09
0.8	307	-96199	0.00	0.8	-3078	-93860	0.03
0.8	20053	-100569	-0.20	0.8	17231	-98267	-0.18
0.9	-5561	-102111	0.05	0.9	-4722	-99724	0.05
0.9	10704	-106884	-0.10	0.9	13988	-104613	-0.13
1.0	-77389	-108442	0.71	1.0	-67107	-106085	0.63

CANTO-8				CANTO-9			
L (m)	H (m)	h (m)	h/L	L (m)	H (m)	h (m)	h/L
240	2.40	1.50	1/160	240	2.40	1.20	1/200
x/L	M	N	e	x/L	M	N	e
-	kN*m	KN	m	-	kN*m	KN	m
0.0	-59824	-104505	0.57	0.0	-44011	-101341	0.43
0.1	15678	-103091	-0.15	0.1	17163	-100042	-0.17
0.1	-4863	-98130	0.05	0.1	-7051	-95014	0.07
0.2	15015	-96730	-0.16	0.2	10020	-93728	-0.11
0.2	-5383	-92323	0.06	0.2	-9208	-89421	0.10
0.3	6926	-91273	-0.08	0.3	3512	-88457	-0.04
0.3	-8707	-86771	0.10	0.3	-9090	-84457	0.11
0.4	-1971	-86071	0.02	0.4	-3128	-83813	0.04
0.4	-14071	-80921	0.17	0.4	-11514	-79820	0.14
0.5	-4932	-80571	0.06	0.5	-4570	-79498	0.06
0.5	-5565	-78748	0.07	0.5	-1356	-79332	0.02
0.5	-16975	-78704	0.22	0.5	-13752	-79292	0.17
0.5	-16975	-78704	0.22	0.5	-13752	-79292	0.17
0.5	-5573	-78748	0.07	0.5	-1362	-79332	0.02
0.5	-4932	-80576	0.06	0.5	-4569	-79502	0.06
0.6	-14071	-80926	0.17	0.6	-11514	-79823	0.14
0.6	-1970	-86076	0.02	0.6	-3126	-83818	0.04
0.7	-8717	-86776	0.10	0.7	-9095	-84461	0.11
0.7	6910	-91277	-0.08	0.7	3501	-88460	-0.04
0.8	-5383	-92327	0.06	0.8	-9204	-89425	0.10
0.8	15003	-96733	-0.16	0.8	10010	-93730	-0.11
0.9	-4842	-98133	0.05	0.9	-7037	-95016	0.07
0.9	15698	-103093	-0.15	0.9	17178	-100043	-0.17
1.0	-59841	-104507	0.57	1.0	-44025	-101342	0.43

CANTO-10			
L (m)	H (m)	h (m)	h/L
240	2.40	1	1/240
x/L	M	N	e
-	kN*m	KN	m
0.0	-35444	-99761	0.36
0.1	16366	-98519	-0.17
0.1	-9007	-93547	0.10
0.2	7482	-92318	-0.08
0.2	-10132	-88132	0.11
0.3	1825	-87209	-0.02
0.3	-8623	-83562	0.10
0.4	-3714	-82947	0.04
0.4	-9863	-79659	0.12
0.5	-4676	-79352	0.06
0.5	791	-80148	-0.01
0.5	-12241	-80109	0.15
0.5	-12241	-80109	0.15
0.5	787	-80148	-0.01
0.5	-4676	-79355	0.06
0.6	-9863	-79663	0.12
0.6	-3712	-82951	0.04
0.7	-8626	-83566	0.10
0.7	1817	-87212	-0.02
0.8	-10127	-88135	0.11
0.8	7473	-92320	-0.08
0.9	-8997	-93549	0.10
0.9	16377	-98520	-0.17
1.0	-35454	-99762	0.36

## 8.4 RESULTADOS ENVOLVENTES DEL FLECTOR

### 8.4.1 SITUACIÓN INICIAL

ENVOLVENTE 1 M max+				ENVOLVENTE 1 Mmax-			
L (m)	H (m)	h (m)	-	L (m)	H (m)	h (m)	-
240	2.4	1	-	240	2.4	1	-
x/L	M max+	N con.	e	x/L	M max-	N con.	e
-	kN*m	KN	m	-	kN*m	KN	m
0.0	-109479	-73185	1.50	0.0	-141843	-72918	1.95
0.0	2487	-68699	-0.04	0.0	-8690	-71252	0.12
0.0	-1808	-61088	0.03	0.0	-13511	-64136	0.21
0.0	38411	-58808	-0.65	0.0	22433	-60957	-0.37
0.0	31292	-53649	-0.58	0.0	16448	-56949	-0.29
0.0	23496	-53219	-0.44	0.0	9697	-53406	-0.18
0.0	18834	-49760	-0.38	0.0	6180	-50978	-0.12
0.0	-123	-49304	0.00	0.0	-12259	-48329	0.25
0.0	-693	-47435	0.01	0.0	-9807	-48564	0.20
0.0	-9890	-46868	0.21	0.0	-23394	-47366	0.49
0.0	-7305	-47448	0.15	0.0	-17265	-49352	0.35
0.0	-21915	-46843	0.47	0.0	-30214	-49585	0.61
0.0	-21915	-46842	0.47	0.0	-30214	-49590	0.61
0.0	-7343	-47448	0.15	0.0	-17306	-49352	0.35
0.0	-9925	-46870	0.21	0.0	-23430	-47368	0.49
0.0	-684	-47437	0.01	0.0	-9798	-48566	0.20
0.0	-116	-49305	0.00	0.0	-12253	-48329	0.25
0.0	18845	-49760	-0.38	0.0	6190	-50979	-0.12
0.0	23508	-53220	-0.44	0.0	9709	-53407	-0.18
0.0	31273	-53650	-0.58	0.0	16427	-56949	-0.29
0.0	38392	-58809	-0.65	0.0	22412	-60958	-0.37
0.0	-1807	-61088	0.03	0.0	-13511	-64137	0.21
0.0	2487	-68701	-0.04	0.0	-8691	-71254	0.12
0.0	-109435	-73187	1.50	0.0	-141801	-72920	1.94

PERMANENTES			
L (m)	H (m)	h (m)	-
240	2.4	1	-
x/L	M	N	e
-	kN*m	KN	m
0.0	-123328	-70005	1.76
0.0	-2989	-66917	0.04
0.0	-7389	-60000	0.12
0.0	29385	-56979	-0.52
0.0	23078	-52696	-0.44
0.0	15390	-50564	-0.30
0.0	11747	-47910	-0.25
0.0	-7633	-46555	0.16
0.0	-5963	-45870	0.13
0.0	-18132	-45215	0.40
0.0	-13312	-46568	0.29
0.0	-25852	-46488	0.56
0.0	-25852	-46488	0.56
0.0	-13350	-46568	0.29
0.0	-18166	-45217	0.40
0.0	-5954	-45872	0.13
0.0	-7628	-46556	0.16
0.0	11757	-47910	-0.25
0.0	15401	-50565	-0.30
0.0	23059	-52697	-0.44
0.0	29366	-56980	-0.52
0.0	-7388	-60001	0.12
0.0	-2990	-66918	0.04
0.0	-123287	-70006	1.76

## 8.4.2 SITUACIÓN FINAL

ENVOLVENTE 1 M max+				ENVOLVENTE 1 M max-			
L (m)	H (m)	h (m)	-	L (m)	H (m)	h (m)	-
240	2.4	2	-	240	2.4	2	-
x/L	M max+	N con.	e	x/L	M max-	N con.	e
-	kN*m	KN	m	-	kN*m	KN	m
0.0	-29387	-107379	0.27	0.0	-44228	-103363	0.43
0.1	22979	-101285	-0.23	0.1	11912	-106981	-0.11
0.1	-6190	-97609	0.06	0.1	-12199	-99825	0.12
0.2	12910	-96519	-0.13	0.2	3802	-99368	-0.04
0.2	-7383	-91416	0.08	0.2	-13831	-95385	0.15
0.3	6954	-92932	-0.07	0.3	-1238	-91924	0.01
0.3	-5443	-87708	0.06	0.3	-13197	-89381	0.15
0.4	2464	-88496	-0.03	0.4	-7677	-87369	0.09
0.4	-7143	-82531	0.09	0.4	-14338	-84198	0.17
0.5	1268	-80999	-0.02	0.5	-8456	-85166	0.10
0.5	4861	-83062	-0.06	0.5	-2465	-82741	0.03
0.5	-11242	-77564	0.14	0.5	-14361	-89291	0.16
0.5	-11242	-77564	0.14	0.5	-14361	-89290	0.16
0.5	4856	-83062	-0.06	0.5	-2470	-82741	0.03
0.5	1268	-81003	-0.02	0.5	-8456	-85169	0.10
0.6	-7142	-82534	0.09	0.6	-14338	-84202	0.17
0.6	2465	-88500	-0.03	0.6	-7676	-87373	0.09
0.7	-5447	-87711	0.06	0.7	-13200	-89385	0.15
0.7	6946	-92935	-0.07	0.7	-1247	-91927	0.01
0.8	-7378	-91419	0.08	0.8	-13827	-95388	0.14
0.8	12902	-96521	-0.13	0.8	3792	-99369	-0.04
0.9	-6180	-97613	0.06	0.9	-12189	-99825	0.12
0.9	22988	-101285	-0.23	0.9	11926	-106982	-0.11
1.0	-29399	-107379	0.27	1.0	-44236	-103363	0.43



PERMANENTES			
L (m)	H (m)	h (m)	-
240	2.4	1	-
x/L	M	N	e
-	kN*m	KN	m
0.0	-35444	-99761	0.36
0.1	16366	-98519	-0.17
0.1	-9007	-93547	0.10
0.2	7482	-92318	-0.08
0.2	-10132	-88132	0.11
0.3	1825	-87209	-0.02
0.3	-8623	-83562	0.10
0.4	-3714	-82947	0.04
0.4	-9863	-79659	0.12
0.5	-4676	-79352	0.06
0.5	791	-80148	-0.01
0.5	-12241	-80109	0.15
0.5	-12241	-80109	0.15
0.5	787	-80148	-0.01
0.5	-4676	-79355	0.06
0.6	-9863	-79663	0.12
0.6	-3712	-82951	0.04
0.7	-8626	-83566	0.10
0.7	1817	-87212	-0.02
0.8	-10127	-88135	0.11
0.8	7473	-92320	-0.08
0.9	-8997	-93549	0.10
0.9	16377	-98520	-0.17
1.0	-35454	-99762	0.36

## 8.5 ENVOLVENTES DE LOS AXILES. CASO FINAL.

ENVOLVENTE 1 N max+				ENVOLVENTE 1 N max-			
240 x/L	2.4 M con.	1.8 N max+	1/133 e	240 x/L	2.4 M con.	1.2 N max-	0.005 e
-	kN*m	KN	m	-	kN*m	KN	m
0.0	-36177	-98511	0.37	0.0	-35789	-111557	0.32
0.1	17003	-97269	-0.17	0.1	16266	-110315	-0.15
0.1	-8966	-92261	0.10	0.1	-9540	-104949	0.09
0.2	7876	-91031	-0.09	0.2	7634	-103720	-0.07
0.2	-9706	-86870	0.11	0.2	-11726	-99000	0.12
0.3	1575	-85948	-0.02	0.3	3445	-98078	-0.04
0.3	-7566	-82616	0.09	0.3	-10933	-93333	0.12
0.4	-4971	-82001	0.06	0.4	-994	-92718	0.01
0.4	-9663	-79628	0.12	0.4	-10701	-87986	0.12
0.5	-4866	-79321	0.06	0.5	-4124	-87679	0.05
0.5	1100	-77513	-0.01	0.5	812	-89421	-0.01
0.5	-11278	-77475	0.15	0.5	-14326	-89382	0.16
0.5	-11278	-77475	0.15	0.5	-14326	-89382	0.16
0.5	1096	-77513	-0.01	0.5	808	-89420	-0.01
0.5	-4865	-79324	0.06	0.5	-4124	-87682	0.05
0.6	-9663	-79632	0.12	0.6	-10700	-87990	0.12
0.6	-4970	-82005	0.06	0.6	-992	-92722	0.01
0.7	-7569	-82620	0.09	0.7	-10937	-93337	0.12
0.7	1567	-85951	-0.02	0.7	3436	-98081	-0.04
0.8	-9701	-86874	0.11	0.8	-11721	-99003	0.12
0.8	7867	-91033	-0.09	0.8	7625	-103721	-0.07
0.9	-8956	-92262	0.10	0.9	-9529	-104951	0.09
0.9	17013	-97270	-0.17	0.9	16278	-110316	-0.15
1.0	-36187	-98512	0.37	1.0	-35800	-111558	0.32